



Ricardo João Silva Monteiro

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Comparação dos Programas *Cypeterm* e RCCTE-STE no âmbito da Simulação Dinâmica de Edifícios

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: José Almeida Dias, Prof. Doutor, FCT-UNL

Júri:

Presidente:	Prof. Doutor José Manuel Paixão Conde
Vogais:	Prof. Doutor João José Lopes de Carvalho
	Prof. Doutor José Fernando de Almeida Dias



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2014

Comparação dos Programas *Cypeterm* e RCCTE-STE no âmbito da Simulação Dinâmica de Edifícios

Copyright © 2014 - Ricardo João Silva Monteiro e Faculdade de Ciências e Tecnologia –
Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologias e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor José Fernando Dias, agradeço a orientação, toda a ajuda, apoio e disponibilidade sempre demonstrada.

O meu obrigado aos meus pais pela oportunidade que me deram em estudar, e pela força que me foi transmitida ao longo do anos. À minha irmã e o meu cunhado pelo apoio incondicional. À minha namorada pela compreensão, paciência e incentivo ao longo dos últimos anos.

Aos meus amigos, pela ajuda e partilha de conhecimentos, discussões e opiniões que me ajudaram nesta importante etapa da minha vida académica.

E a todos aqueles que de alguma forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho, o meu obrigado!

Resumo

A presente dissertação tem como objetivo primordial realizar a comparação entre o programa de simulação monozona *RCCTE-STE* do LNEG e o programa de simulação dinâmica multizona *Cypeterm* que permite utilizar o motor de cálculo do *EnergyPlus* de forma a executar a simulação térmica de edifícios. Para tal foram considerados dois casos de estudo diferentes.

O primeiro caso de estudo considerado foi um edifício de escritórios que funciona em *open-space*. É feita uma descrição detalhada dos dados inseridos nos dois programas, em particular os referentes aos elementos construtivos do edifício, aos sistemas de climatização e ventilação e aos perfis de ocupação, equipamentos e iluminação. Por fim realizou-se uma comparação crítica e exaustiva dos resultados entre os dois programas sendo que o *Cypeterm* foi designado como o melhor, devido às suas qualidades de cálculo do *EnergyPlus* e pela sua interface gráfica bastante intuitiva, que o torna bastante rápido e eficaz na introdução e alteração de dados.

No segundo caso de estudo foi delineado um edifício com mais de 1000 m² com múltiplos espaços no seu interior. Deste modo procedeu-se a uma comparação monozona face a uma simulação multizona que permitiu demonstrar que esta última é mais vantajosa e capaz, particularmente no dimensionamento do equipamento de climatização do edifício e análise energética de cada espaço.

Foram também efetuadas alterações estruturais num dos edifícios estudados, de modo a perceber a sua influência a nível energética em qualquer edifício. De salientar ainda que todo este trabalho teve como base os regulamentos RCCTE e RSECE.

Palavras-Chave: Simulação Térmica de Edifícios; *Cypeterm*; *EnergyPlus*; RCCTE; RSECE; Eficiência Energética.

Abstract

This dissertation has as its primary objective the comparison between the monzone simulation program RCCTE-STE from LNEG and the dynamic multizone simulation program Cypeterm which uses the EnergyPlus calculation engine to perform the thermal simulation of buildings. For this comparison was considered two different study cases.

The first case study was an office building that works in open-space. It is made a detailed description of data entered in both programs, in particular those referring to constructive elements of the building, climatization and ventilation system, and occupancy, equipment and illumination profiles. Finally it was carried out a critical and thorough comparison of the results between the two programs in which Cypeterm was designated as the best due to EnergyPlus' calculation qualities and its intuitive graphical interface which makes it quicker and effective in introduction and modification of data.

In the second case study was designed a building over 1000 m² with multiple indoor spaces. Thus it was proceeded a comparison between monozone and multizone simulation which allows to demonstrate that the latter is more advantageous and capable, particularly in sizing of climatization equipment of the building and energy analysis of each area.

Structural changes were also made in one of the studied buildings, in order to understand their energy influence in any building. This paper was based on the RCCTE and RSECE regulations.

Key-words: Building Energy Simulation; Cypeterm; EnergyPlus; RCCTE; RSECE; Energy Efficiency.

Índice de Matérias

1.	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura do trabalho	3
2.	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Equação fundamental para o problema da climatização	5
2.2	Legislação nacional de energia de edifícios	6
2.2.1	SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior dos Edifícios	6
2.2.2	RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios	6
2.2.3	RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios	7
2.2.3.1	Estação de aquecimento	8
2.2.3.2	Estação de arrefecimento	13
2.3	Simulação dinâmica – Norma <i>ASHRAE</i> 140-2004	16
2.4	Programas de simulação dinâmica detalhada	16
2.4.1	RCCTE-STE	17
2.4.2	Cypeterm	18
2.4.3	Energyplus	19
3.	Caso de Estudo Monozona	21
3.1	Caracterização do Edifício Monozona	21
3.1.1	Localização e Zona Climática do Edifício	21
3.1.2	Estrutura do Edifício	22
3.1.3	Caracterização dos elementos da envolvente	23
3.1.3.1	Paredes Exteriores	23
3.1.3.2	Pavimento	24
3.1.3.3	Cobertura	24
3.1.4	Pontes Térmicas	25
3.1.5	Inércia Térmica	26
3.1.6	Vãos Envidraçados	27
3.1.7	Caracterização do funcionamento do edifício monozona	28
3.2	Simulação Cypeterm/Energyplus	29
3.2.1	Resultados	32
3.2.1.1	Verificação do RCCTE	32
3.2.1.2	Pontes Térmicas Lineares	33
3.2.1.3	Necessidades energéticas ao longo do ano	34
3.2.1.4	Cargas térmicas	36
3.3	Simulação RCCTE-STE	37

3.3.1	Resultados	39
3.3.1.1	Verificação do RCCTE	39
3.3.1.2	Necessidades energéticas ao longo do ano	39
3.3.1.3	Cargas térmicas.....	40
3.4	Comparação de resultados.....	41
3.4.1	Verificação do RCCTE	41
3.4.2	Cargas térmicas	42
3.4.3	Necessidades energéticas ao longo do ano.....	42
3.5	Análise de resultados.....	43
4.	Alterações ao Caso de Estudo Monozona	47
4.1	Pé direito	47
4.2	Inércia Térmica	51
4.3	Vãos Envidraçados.....	55
4.3.1	Alteração 1 – aumento da área de envidraçados Este e Oeste.....	56
4.3.2	Alteração 2 – aumento da área de envidraçados a Norte	57
4.3.3	Alteração 3 – aumento da área de envidraçados a Sul	58
4.3.4	Alteração 4 – Colocação de vãos envidraçados horizontais.....	59
4.4	Varandins Interiores	61
4.5	Considerações finais do capítulo.....	62
5.	Caso de Estudo Multizona.....	65
5.1	Definição do Caso de Estudo Multizona.....	65
5.2	Comparação monozona.....	66
5.2.1	Cargas térmicas e necessidades energéticas.....	66
5.2.2	Indicador de Eficiência Energética (IEE).....	68
5.3	Comparação monozona vs multizona.....	72
5.3.1	Resultados	74
5.3.2	Análise de resultados	76
5.4	Resultados multizona	77
5.4.1	Necessidades energéticas por compartimento.....	78
5.4.2	Cargas térmicas por compartimento.....	82
5.4.2.1	Situação 1	82
5.4.2.2	Situação 2	83
5.4.2.3	Situação 3	87
5.5	Considerações finais do capítulo.....	88
6.	Conclusões	89
	Bibliografia	91
	Anexos	93

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Esquema simulação dinâmica de edifícios.....	2
Figura 2.1 - Esquema de ligação entre os três regulamentos: SCE, RCCTE e RSECE.....	6
Figura 2.2 - Circuito de analogia reo-elétrica do programa RCCTE-STE [5]	17
Figura 2.3 - Ambiente de trabalho do <i>Cypeterm</i>	19
Figura 2.4 - Esquema simplificado do funcionamento modular do Energyplus [1]	20
Figura 3.1 - Localização geográfico do edifício monozone.....	21
Figura 3.2 - Pormenor da Parede Exterior	23
Figura 3.3 - Pormenor do Pavimento	24
Figura 3.4 - Pormenor da Cobertura	24
Figura 3.5 - Pormenor da PTP	26
Figura 3.6 - Introdução de dados no <i>Cypeterm</i>	29
Figura 3.7 - Vista 3D do edifício monozone.....	30
Figura 3.8 - Definição do tipo de compartimento no <i>Cypeterm</i>	31
Figura 3.9 - Definição dos parâmetros da fração autónoma no <i>Cypeterm</i>	32
Figura 3.10 - Comparação entre as necessidades nominais de energia e os valores limite.....	33
Figura 3.11 - Necessidades de aquecimento do edifício monozone.....	35
Figura 3.12 - Necessidades de arrefecimento do edifício monozone.....	35
Figura 3.13 - Cargas térmicas de aquecimento hora a hora (31 de Janeiro)	36
Figura 3.14 - Cargas térmicas de arrefecimento hora a hora (29 de Agosto).....	36
Figura 3.15 - Introdução do tipo de sistema de climatização no RCCTE-STE.....	37
Figura 3.16 - Introdução de dados no RCCTE-STE e interface do STE	38
Figura 3.17 - Comparação entre as necessidades nominais de energia e os valores limite.....	39
Figura 3.18 - Necessidades de aquecimento e arrefecimento	40
Figura 3.19 - Evolução da temperatura ao longo da 4ª semana e da 35ª semana do ano, respectivamente.....	40
Figura 3.20 - Comparação das necessidades nominais de energia obtidas pelos dois programas	41
Figura 3.21 - Comparação das cargas de aquecimento e arrefecimento obtidas pelos dois programas	42
Figura 3.22 - Comparação das necessidades energéticas de aquecimento obtidas pelos dois programas.....	43
Figura 3.23 - Comparação das necessidades energéticas de arrefecimento obtidas pelos dois programas.....	43
Figura 3.24 - Quadro de ventilação apresentado pelo RCCTE-STE.....	44
Figura 4.1- Perdas térmicas consideradas no cálculo de Nic	47
Figura 4.2 - Evolução das necessidades de aquecimento e arrefecimento com o aumento do pé direito	49
Figura 4.3 - Evolução das necessidades energéticas totais com o aumento do pé direito.....	49
Figura 4.4 - Evolução das potências de aquecimento e arrefecimento com o aumento do pé direito.....	50

Figura 4.5 - Alteração da localização do elemento isolante.....	51
Figura 4.6 - Evolução da temperatura exterior e das cargas térmicas de arrefecimento ao longo do dia 29 de Agosto com uma inércia de classe fraca ($I_t = 107,95$).....	53
Figura 4.7 - Evolução da temperatura exterior e das cargas térmicas de arrefecimento ao longo do dia 29 de Agosto com uma inércia de classe média ($I_t = 265,95$).....	53
Figura 4.8 - Evolução da temperatura exterior e das cargas térmicas de arrefecimento ao longo do dia 29 de Agosto com uma inércia de classe forte ($I_t = 412,83$).....	53
Figura 4.9 - Evolução da temperatura exterior e interior do edifício com uma inércia de classe fraca	54
Figura 4.10 - Evolução da temperatura exterior e interior do edifício com uma inércia de classe média.....	54
Figura 4.11 - Evolução da temperatura exterior e interior do edifício com uma inércia de classe forte	55
Figura 4.12 - Evolução de Nic, Nvc e necessidades energéticas totais com o aumento da área dos vãos envidraçados a Este e Oeste.....	56
Figura 4.13 - Evolução de Nic, Nvc e necessidades energéticas totais com o aumento da área dos vãos envidraçados a Norte	57
Figura 4.14 - Evolução de Nic, Nvc e necessidades energéticas totais com o aumento da área dos vãos envidraçados a Sul	58
Figura 4.15 – Exemplo ilustrativo de um vão envidraçado horizontal	59
Figura 4.16 - Evolução de Nic, Nvc e necessidades energéticas totais com o aumento da área de vão envidraçado horizontal.....	60
Figura 4.17 - Vista 3D do edifício monozona com as claraboias colocadas.....	60
Figura 4.18 - Exemplo ilustrativo de um <i>mezzanine</i>	61
Figura 5.1 - Comparação das necessidades energéticas de arrefecimento obtidas pelos dois programas.....	67
Figura 5.2 - Comparação das cargas de aquecimento e arrefecimento obtidas pelos dois programas	67
Figura 5.3 - Comparação das necessidades energéticas de aquecimento obtidas pelos dois programas	67
Figura 5.4 - Simulação multizona e exportação para o <i>EnergyPlus</i> , no <i>Cypeterm</i>	74
Figura 5.5 - Comparação das necessidades energéticas de aquecimento (monozona vs multizona) ..	74
Figura 5.6 - Comparação das necessidades energéticas de arrefecimento (monozona vs multizona)	75
Figura 5.7 - Cargas térmicas de aquecimento no dia 18 de Dezembro (monozona vs multizona)	75
Figura 5.8 - Cargas térmicas de arrefecimento no dia 18 de Dezembro (monozona vs multizona)....	76
Figura 5.9 - Necessidades energéticas do Gabinete 1	79
Figura 5.10 - Necessidades energéticas do Gabinete 6	79
Figura 5.11 - Necessidades energéticas do Gabinete 9	79
Figura 5.12 - Necessidades energéticas do Hall de Entrada	80
Figura 5.13 - Necessidades energéticas do Corredor	80
Figura 5.14 - Necessidades energéticas da Sala de Reuniões 1	80
Figura 5.15 - Necessidades energéticas da Sala de Reuniões 2	80
Figura 5.16 - Necessidades energéticas da Sala de Reuniões 3	81

Figura 5.17 - Evolução das cargas térmicas de aquecimento de todos os compartimentos ao longo dia 31 de Janeiro	82
Figura 5.18 - Evolução das cargas térmicas de arrefecimento de todos os compartimentos ao longo dia 29 de Agosto	83
Figura 5.19 - Evolução das cargas térmicas de arrefecimento de três gabinetes ao longo do dia 4 de Julho.....	84
Figura 5.20 - Evolução das cargas térmicas de aquecimento de três gabinetes ao longo do dia 5 de Março	84
Figura 5.21 - Evolução das cargas térmicas de aquecimento de três gabinetes ao longo do dia 18 de Dezembro.....	84
Figura 5.22 - Evolução das cargas térmicas de arrefecimento de três gabinetes ao longo do dia 29 de Agosto.....	85
Figura 5.23 - Ganhos de calor pelos vãos envidraçados do Gabinete 11 (Sul).....	85
Figura 5.24 - Ganhos de calor pelos vãos envidraçados do Gabinete 3 (Norte)	85
Figura 5.25 - Perdas de calor pelo vãos envidraçados do Gabinete 11 (Sul).....	86
Figura 5.26 - Perdas de calor pelo vãos envidraçados do Gabinete 3 (Norte)	86
Figura 5.27 - Evolução da temperatura da exterior no dia 18 de Dezembro.....	86
Figura 5.28 - Evolução da temperatura da exterior no dia 5 de Março.....	86
Figura 5.29 - Cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento, no dia 22 de Abril, do Hall de Entrada.....	87
Figura 5.30 - Cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento, no dia 22 de Abril, da Sala de Reuniões 3.....	87

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Resumo da aplicação dos regulamentos RSECE e RCCTE.....	15
Tabela 3.1 - Dados climáticos para o concelho de Lisboa	22
Tabela 3.2 - Valores das resistências térmicas superficiais	25
Tabela 3.3 - Valores do coeficiente global de transmissão térmica da cobertura	25
Tabela 3.4 - Classe de inércia térmica interior segundo o RCCTE.....	27
Tabela 3.5 - Síntese dos parâmetros de funcionamento do edifício mo.....	28
Tabela 3.6 - Resultados do <i>Cypeterm</i> , necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento	32
Tabela 3.7 - Pontes térmicas lineares existentes no edifício em estudo fornecidas pelo <i>Cypeterm</i>	33
Tabela 3.8 - Necessidades de aquecimento ao longo do ano fornecidas pelo <i>Cypeterm</i>	34
Tabela 3.9 - Necessidades de arrefecimento ao longo do ano fornecidas pelo <i>Cypeterm</i>	35
Tabela 3.10 - Resultados do RCCTE-STE, necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento	39
Tabela 3.11 – Potências fornecidas pelo RCCTE-STE.....	40
Tabela 4.1- Resultados obtidos com o aumento do pé direito do edifício monozone.....	48
Tabela 4.2 - Resultados obtidos com o aumento da inércia térmica	52
Tabela 4.3 - Resultados obtidos com a introdução de um <i>mezzanine</i> e consequente aumento de área	62
Tabela 5.1 - Dados provenientes do RCCTE.....	70
Tabela 5.2 - Consumos anuais do edifício	71
Tabela 5.3 - Classes energéticas para edifícios.....	71
Tabela 5.4 - Resultados do IEE e classe energética para os dois programas	72
Tabela 5.5 - Parâmetros de funcionamento do edifício multizona.....	73
Tabela 5.6 – Necessidades energéticas de aquecimento por compartimento.....	78
Tabela 5.7 - Necessidades energéticas de arrefecimento por compartimento.....	78
Tabela 5.8 - Síntese dos dados climáticos dos dias 18 de Dezembro e 5 de Março	86

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

ADENE - Agência para a Energia

AQS - Águas Quentes Sanitárias

ASHRAE - *American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers*

AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

DL - Decreto-lei

DOE - *Department of Energy*

FF - Fator de Formar

EPW - *EnergyPlus Weather file*

INETI - Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia

QAI - Qualidade do Ar Interior

PRE - Plano de Racionalização Energética

PTL - Ponte Térmica Linear

PTL - Ponte Térmica Plana

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico do Edifícios

RPH - Renovações de ar por hora

RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

SCE - Sistema de Certificação Energética

STE - Simulação Térmica de Edifícios

TRACE - *Trane Air Conditioning Economics*

TRNSYS - *TRaNsient SYstem Simulation*

XPS - Poliestireno Extrudido

A_p - Área útil de pavimento [m^2]

F_{CI} - Fator de correção do consumo de energia de aquecimento

F_{CV} - Fator de correção de consumo de energia de arrefecimento

GD - Graus dias de aquecimento [$^{\circ}C.dia$]

G_{sul} - Energia solar média mensal incidente a Sul

IEE - Indicador de eficiência energética [$kg_{ep}/m^2.ano$]

IEE_I - Indicador de eficiência energética de aquecimento [$kg_{ep}/m^2.ano$]

IEE_v - Indicador de eficiência energética de arrefecimento [$kg_{ep}/m^2.ano$]

kg_{ep} - Quilograma equivalente de petróleo

N_i - Necessidades nominais de aquecimento máximas [$kWh/m^2.ano$]

N_{II} - Necessidades máximas de aquecimento permitidas pelo RCCTE, calculadas para o edifício em estudo, como se estivesse localizado na zona de referência II [$kWh/m^2.ano$]

N_{ic} - Necessidades nominais de aquecimento [$kWh/m^2.ano$]

N_{II} - Necessidades máximas de aquecimento permitidas pelo RCCTE, calculadas para o edifício em estudo, na zona onde está localizada o edifício [$kWh/m^2.ano$]

N_v - Necessidades nominais de arrefecimento máximas [$kWh/m^2.ano$]

N_{V1} - Necessidades máximas de arrefecimento permitidas pelo RCCTE, calculadas para o edifício em estudo, como se estivesse localizado na zona de referência I1-V1 [$kWh/m^2.ano$]

N_{Vi} - Necessidades máximas de aquecimento permitidas pelo RCCTE, calculadas para o edifício em estudo, na zona onde está localizada o edifício [$kWh/m^2.ano$]

R - resistência térmica do elemento [$m^2.{}^{\circ}C/W$]

R_{se} - resistência térmica superficial exterior [$m^2.{}^{\circ}C/W$]

R_{si} - resistência térmica superficial interior [$m^2.{}^{\circ}C/W$]

U - Coeficiente global de transmissão térmica [$W/(m^2.{}^{\circ}C)$]

1. Introdução

1.1 Enquadramento

O crescente consumo de energia primária a nível mundial, nas últimas décadas, tem gerado preocupações no que concerne a limitações das reservas energéticas, ao seu fornecimento e ao impacto ambiental resultante do aumento de emissões de CO₂. A contribuição global de edifícios para o consumo de energia, tanto residenciais como de serviços, tem vindo a aumentar atingindo valores entre 20% e 40% nos países desenvolvidos, superando sectores como a indústria ou os transportes. Este facto deve-se ao aumento da população mundial, ao crescimento do setor de serviços, à exigência quanto aos níveis de conforto e ao aumento do tempo gasto no interior dos edifícios. Neste sentido, o estudo do comportamento térmico dos edifícios assim como a sua eficiência energética ganharam elevada importância, sendo atualmente uns dos principais objetivos das políticas energéticas em todo o mundo [1].

Com o objetivo de reduzir o consumo de energia dos edifícios têm sido propostas várias iniciativas nesse sentido. Por exemplo, a Comissão Europeia lançou em 2002 a diretiva relativa ao Desempenho Energético de Edifícios (EPBD – *Energy Performance Building Directive*) 2002/91/EC que estabelece que os Estados Membros da União Europeia devem implementar um sistema de certificação energética de forma a informar o cidadão sobre a qualidade térmica dos edifícios exigindo também que o sistema certificado abranja igualmente todos os grandes edifícios públicos e de serviços. Mais tarde, a 4 de Abril de 2006, a EPBD foi levado para Portugal através da publicação de três Decretos-Lei [2]. Assim, em Portugal, vigoravam três diplomas relacionados com a certificação energética e o desempenho energético em edifícios, sendo o Decreto-Lei n.º 78/2006, relativo ao Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE), o Decreto-Lei n.º 79/2006, que aprova o novo Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) e o Decreto-Lei n.º 80/2006, que aprova o novo Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).

O presente trabalho realizou-se com base no SCE, RSECE e RCCTE porque eram os regulamentos que se encontravam em vigor na altura em que se iniciou o mesmo. Porém já se encontram desatualizados visto que durante o ano de 2013 entrou em vigor o Decreto-Lei n.º 118/2013 que engloba o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

Uma das formas de prever o consumo de energia dos edifícios são os programas de simulação dinâmica dos edifícios que fornecem o índice de desempenho dos mesmos. Um programa deste tipo tem a capacidade de analisar o comportamento térmico de um edifício 24 horas por dia ao longo de 1 ano, permite dimensionar com precisão potências térmicas dos equipamentos a instalar e ainda quantificar e otimizar soluções construtivas, de sombreamento, ganhos solares úteis, arrefecimento/aquecimento através de soluções ativas, passivas ou híbridas.

Este tipo de análise compatibiliza as soluções de instalações técnicas e construtivas, com aspetos arquitetónicos e funcionais, tendo em conta a localização, ocupação e cargas internas, otimizando assim os edifícios em estudo. Em Portugal, um dos programas deste género mais utilizado é o RCCTE-STE distribuído pelo LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia), que é considerado um programa de simulação simplificada. Contudo a nível internacional, o programa *EnergyPlus* é considerado o estado de arte dos programas de simulação energética de edifícios e é largamente utilizado por especialistas e iniciantes da simulação.



Figura 1.1 - Esquema simulação dinâmica de edifícios

1.2 Objetivos

Inserindo-se na temática anterior, com este trabalho pretende-se obter conhecimentos avançados na utilização de programas de simulação térmica de edifícios. Nesse sentido o trabalho terá os seguintes objetivos:

- Efetuar uma revisão bibliográfica dos regulamentos em vigor em Portugal e dos programas de simulação utilizados, com o intuito de avaliar as suas funcionalidades bem como as suas metodologias de cálculo.

- O principal objetivo passa por efetuar a simulação dinâmica de um determinado edifício com dois programas diferentes, o RCCTE-STE do LNEG e o *Cypeterm* que possibilita a utilização do motor de cálculo do *EnergyPlus*.
- Fazer uma análise comparativa, crítica e detalhada aos resultados obtidos com os dois programas.
- Efetuar diversas alterações ao edifício inicialmente estudado com o intuito de entender qual a tendência das respostas energéticas desse edifício para as várias modificações.

1.3 Estrutura do trabalho

Para alcançar os objetivos estabelecidos atrás, foram considerados dois casos de estudo diferentes: um primeiro designado por Caso de Estudo Monozona para o qual foi projetado um edifício do tipo *open-space* com 600 m² e um segundo chamado Caso de Estudo Multizona onde será utilizado um edifício com vários espaços no seu interior com uma área superior a 1000 m². Assim, esta dissertação está organizada, em 6 capítulos, da seguinte forma:

- Capítulo 1 – foi realizado um enquadramento do tema, apresentados os objetivos e definida a estrutura do trabalho.
- Capítulo 2 – foram abordados os regulamentos energéticos utilizados em Portugal e os respetivos parâmetros de verificação. Ainda se demonstraram as perdas/ganhos de calor considerados pela norma ASHRAE. Foram também caracterizados os programas de simulação utilizados ao longo do trabalho.
- Capítulo 3 – inicia-se com a descrição do primeiro caso de estudo (*open-space* de 600 m²), para depois se realizar a simulação térmica com o *Cypeterm* e com o *RCCTE-STE*. No fim faz-se uma comparação entre os resultados obtidos pelos dois programas.
- Capítulo 4 – realizaram-se diversas alterações ao caso de estudo do capítulo 3, com o propósito de compreender as respostas energéticas do edifício a essas mesmas alterações.
- Capítulo 5 – neste capítulo será introduzido o segundo caso de estudo (edifício com mais de 1000 m²) onde, inicialmente, é descrito um edifício designado por edifício multizona que terá algumas semelhanças ao utilizado no capítulo 3. Será ainda realizada uma comparação/estudo monozona vs multizona.
- Capítulo 6 – aqui apresentam-se as principais conclusões desta dissertação e referem-se possíveis trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Equação fundamental para o problema da climatização

O problema da climatização de um edifício, onde se pretende manter a sua temperatura e humidades constantes ao longo do tempo no seu interior, é um problema transiente com condições de fronteira temperatura, radiação, intensidade do vento mais ou menos aleatórias e variáveis ao longo do tempo.

Este problema pode ser descrito pela equação diferencial que se segue [3]:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{inf} - T_z) + \dot{Q}_{sist} \quad (1)$$

Onde o balanço de energia envolve processos de convecção, condução e de radiação os quais ocorrem em superfícies internas e externas para cada elemento do edifício em estudo. Resultando as necessidades energéticas do edifício do balanço energético no interior das zonas térmicas definidas.

Nesta equação:

$$C_z = \rho_{ar} c_p C_t$$

C_t – fator de ponderação da transferência de calor sensível

C_p – calor específico a pressão constante

$C_z \frac{dT_z}{dt}$ – energia armazenada no ar interior da zona

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ – somatório dos ganhos internos por convecção

$\sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ – transferência de calor por convecção das superfícies interiores

$\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ - transferência de calor devido a trocas de ar entre zonas

$\dot{m}_{inf} C_p (T_{inf} - T_z)$ – transferência de calor por infiltração de ar exterior

\dot{Q}_{sist} – fluxo de calor associado aos sistemas AVAC instalados

A complexidade desta equação levou a que surgissem normas, como por exemplo a ASHRAE, para de uma forma uniforme e sistemática fossem abordados cada um dos termos referidos.

2.2 Legislação nacional de energia de edifícios

O cálculo das cargas térmicas de cada compartimento deverá ter em consideração as trocas de calor através das superfícies envolventes, as que resultam da renovação do ar dos compartimentos bem como as da utilização dos espaços.

A quantificação das cargas térmicas, os caudais de ventilação e a metodologia de cálculo a considerar são sugeridas pela norma ASHRAE que será descrita mais à frente neste capítulo. Serão observadas de seguida todas as regulamentações em vigor e obrigatoriamente aplicáveis em Portugal. Destacam-se o SCE, RSECE e RCCTE:

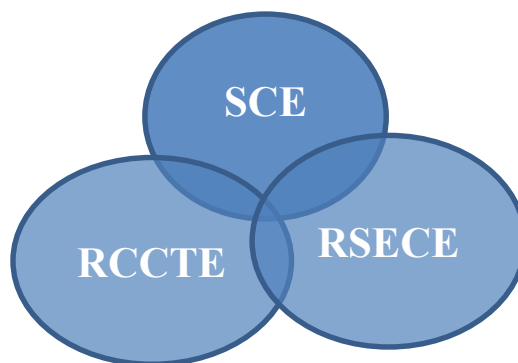


Figura 2.1 - Esquema de ligação entre os três regulamentos: SCE, RCCTE e RSECE

2.2.1 SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior dos Edifícios

O Decreto-Lei n.º 78/2006 [4] tem como principais objetivos certificar o desempenho energético e qualidade do ar interior nos edifícios, garantir as exigências impostas pelo RCCTE e do RSECE e identificar medidas de correção ou melhoria dos sistemas energéticos existentes no edifício relativamente a problemas construtivos que prejudicam a habitabilidade do mesmo.

2.2.2 RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

O Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), tenta introduzir medidas de racionalização, fixando limites à potência máxima dos sistemas a instalar num edifício, de modo a evitar o seu sobredimensionamento, contribuindo assim para a sua eficiência energética. A qualidade do ar interior surge também como um requisito deste regulamento abrangendo as taxas de renovação do ar interior nos espaços e a concentração máxima dos principais poluentes [5].

2.2.3 RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

O Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) analisa separadamente as estações de aquecimento e de arrefecimento, mantendo requisitos de funcionamento em função de cada zona climática.

O RCCTE veio melhorar os requisitos de qualidade para os novos edifícios de habitação e de pequenos serviços sem sistemas de climatização, principalmente ao nível das características da envolvente, limitando as perdas térmicas e controlando os ganhos solares excessivos. O RCCTE aplica-se obrigatoriamente a cada uma das frações autónomas de todos os edifícios referidos atrás [6] [7].

A metodologia geral de cálculo para a verificação regulamentar dos edifícios aponta para a estimação de valores nominais de consumo, para a estação de arrefecimento e estação de aquecimento, para dadas condições de referência do ambiente interior. Estas condições interiores de referência são:

- Para a estação de aquecimento, o valor de 20°C para a temperatura interior;
- Para a estação de arrefecimento, o valor de 25°C para a temperatura interior e 50% de humidade relativa interior;

Os índices térmicos fundamentais a quantificar são as *Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento* (Nic) e as *Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento* (Nvc). Segundo o regulamento estes índices não podem exceder dados valores limites que constituem os requisitos energéticos a observar – Ni e Nv, para aquecimento e arrefecimento, respetivamente [6] [7].

Note-se que, neste trabalho é determinante perceber como se determinam as perdas/ganhos de calor, a nível dos regulamentos (neste caso no RCCTE) e sobretudo como se determinam de forma instantânea, pois serão estes valores que os programas de simulação dinâmica irão calcular. Como se verá de seguida, os valores referentes ao RCCTE são valores médios/normalizados desses valores instantâneos. Estes últimos podem ser encontrados na *ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers)* [8]. Posto isto, tendo em consideração que as cargas consideradas para a estação de aquecimento diferem das da estação de arrefecimento, de seguida apresentam-se esses valores.

2.2.3.1 Estação de aquecimento

$$N_{ic} = \frac{(Q_t + Q_v - Q_{gu})}{A_p} \quad (kWh/m^2.ano) \quad 2)$$

Onde as variáveis representam:

Q_t – perdas de calor por condução através da envolvente do edifício (W/°C);

Q_v – perdas de calor resultantes da renovação do ar (W/°C);

Q_{gu} – ganhos de calor úteis, resultantes da iluminação, dos equipamentos, dos ocupantes e dos ganhos solares através dos envidraçados (W/°C);

A_p – área útil de pavimento do edifício/fração autónoma (m²).

Perdas de calor por condução através da envolvente dos edifícios

$$Q_t = Q_{ext} + Q_{lna} + Q_{pe} + Q_{pt} \quad (kWh) \quad 3)$$

Onde:

Q_t - Perdas de calor por condução através da envolvente (kWh);

Q_{ext} – Perdas de calor pelas zonas correntes das paredes, envidraçados, coberturas e pavimentos em contacto com o exterior (kWh);

Q_{lna} – Perdas de calor pelas zonas correntes das paredes, envidraçados e pavimentos em contacto com locais não aquecidos (kWh);

Q_{pe} – Perdas de calor pelos pavimentos e paredes em contacto com o solo (kWh);

Q_{pt} – Perdas de calor pelas pontes térmicas lineares existentes no edifício (kWh).

Perdas de calor pela envolvente em zona corrente

As perdas de calor pelas zonas correntes de paredes, pontes térmicas planas, envidraçados, coberturas e pavimentos em contacto com o exterior (Q_{ext}), são calculadas em cada momento para cada um desses elementos:

$$q_{ext} = U \cdot A \cdot (\theta_i - \theta_{atm}) \quad (W) \quad 4)$$

Onde:

U - Coeficiente de transmissão térmica do elemento da envolvente (W/m².°C);

A - Área do elemento da envolvente medida pelo interior (m²);

θ_i - Temperatura do ar no interior no edifício (°C);

θ_{atm} - Temperatura do ar exterior (°C).

Em termos de RCCTE, a energia necessária para compensar estas perdas é calculada pela expressão:

$$Q_{ext} = 0,024 \cdot U \cdot A \cdot GD^1 \quad (kWh) \quad 5)$$

Onde:

GD – Número de graus-dias da localidade em que o edifício se situa (°C.dias).

Perdas de calor pela envolvente em zona corrente

As perdas pelas zonas correntes das paredes, envidraçados e pavimentos que separam um espaço aquecido de um local não-aquecido, Q_{lna} , são determinadas pela seguinte expressão:

$$q_{lna} = U \cdot A \cdot (\theta_i - \theta_a) \quad (W) \quad 6)$$

Onde:

θ_a - Temperatura do ar do local não aquecido (°C);

A temperatura do ar do local não-aquecido, θ_a , toma o seguinte valor:

$$\theta_a = \theta_{atm} + (1 - \tau) \cdot (\theta_i - \theta_{atm}) \quad (°C) \quad 7)$$

Onde:

θ_i - Temperatura do ar no interior no edifício (°C);

θ_{atm} - Temperatura do ar exterior (°C);

θ_a - Temperatura do ar do local não aquecido (°C).

E o valor de τ é dado pela expressão:

$$\tau = \frac{\theta_i - \theta_a}{\theta_i - \theta_{atm}} \quad 8)$$

1 Define-se como o somatório das diferenças positivas registadas entre a temperatura base (de 20°C) e a temperatura do ar exterior ao longo da estação de aquecimento (quadro III.1 do RCCTE):
 $GD = \sum (\theta_{base} - \theta_{atm}) 1h/24$

Pelo RCCTE, para se determinar a energia necessária para compensar as perdas referidas (Q_{lna}), basta integrar a equação de perdas instantâneas de calor em regime permanente:

$$Q_{lna} = 0,024 \cdot U \cdot A \cdot GD \cdot \tau \quad (kWh) \quad 9)$$

Perdas por pavimentos e paredes em contacto com o solo

As perdas instantâneas de calor através da envolvente em contacto com o solo são calculadas pela seguinte expressão:

$$q_{pe} = \sum \varphi_j B_j (\theta_i - \theta_{atm}) = L_{pe} (\theta_i - \theta_{atm}) \quad (W) \quad 10)$$

Onde:

φ_j - coeficiente de transmissão térmica linear do elemento j ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);

B_j - desenvolvimento da parede medido pelo interior do elemento j (m);

L_{pe} - perdas unitárias de calor através dos elementos de construção em contacto com o terreno,

$L_{pe} = \sum \psi_j \cdot B_j$ ($W/^\circ C$).

Mais uma vez em termos de RCCTE, Q_{pe} , é obtido pela integração das perdas instantâneas ao longo do período de aquecimento:

$$Q_{pe} = 0,024 \cdot L_{pe} \cdot GD \quad (kWh) \quad 11)$$

Perdas de calor pelas pontes térmicas lineares

As perdas instantâneas de calor através das pontes térmicas lineares são calculadas pela seguinte expressão:

$$q_{pt} = \sum \varphi_j B_j (\theta_i - \theta_{atm}) = L_{pt} (\theta_i - \theta_{atm}) \quad (W) \quad 12)$$

Onde:

φ_j - coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica linear j ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);

B_j - desenvolvimento da ponte térmica linear j medido pelo interior (m);

L_{pt} - perdas unitárias de calor através das pontes térmicas, $L_{pt} = \sum \psi_j \cdot B_j$ ($W/^\circ C$).

Assim em termos de RCCTE, Q_{pt} , é obtido pela integração das perdas instantâneas ao longo do período de aquecimento:

$$Q_{pt} = 0,024 \cdot L_{pt} \cdot GD \quad (kWh) \quad 13)$$

Perdas de calor resultantes da renovação de ar

As perdas instantâneas resultantes da renovação de ar, (Q_v), são determinadas pela seguinte expressão:

$$q_v = \rho C_p R_{ph} V (\theta_i - \theta_{atm}) / 3600 = 0,34 R_{ph} V (\theta_i - \theta_{atm}) \quad (W) \quad 14)$$

Onde:

Q_v - Perdas de calor resultantes da renovação de ar (kWh);

ρ - massa volúmica do ar (1,21 kg/m³);

C_p - calor específico do ar (1005,6 J/kg. °C);

R_{ph} - número de renovações horárias do ar interior (h⁻¹);

V - volume interior da fração autónoma ($A_p \times P_d$).

Então Q_v para toda a estação de aquecimento pode ser obtido pela integração das perdas instantâneas:

$$Q_v = 0,024 \cdot (0,34 \cdot R_{ph} \cdot A_p \cdot P_d) \cdot GD \cdot (1 - \eta_v) \quad 15)$$

Onde:

A_p - Área útil de pavimento (m²);

P_d - Pé direito (m);

GD - Número de graus-dias da localidade em que o edifício se situa (°C.dias).

Ganhos térmicos úteis na estação de aquecimento

Os ganhos térmicos brutos, Q_g , são determinados da seguinte forma:

$$Q_g = Q_i + Q_s \quad (kWh) \quad 16)$$

Onde:

Q_i - ganhos térmicos associados a fontes internas de calor;

Q_s - ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar através dos vãos envidraçados.

Ganhos térmicos brutos resultantes

Como exemplos de ganhos térmicos internos temos o equipamento, a iluminação e os ocupantes do edifício.

Os ganhos de calor de fontes internas durante toda a estação de aquecimento são calculados da seguinte forma:

$$Q_i = 0,72 \cdot q_i \cdot M \cdot A_p \quad (kWh) \quad 17)$$

Onde:

q_i – ganhos térmicos internos médios por unidade de área útil de pavimento (W/m^2);

M – duração média da estação convencional de aquecimento (meses).

Ganhos solares brutos através dos envidraçados

Os ganhos solares brutos através dos vãos envidraçados são determinados pela seguinte expressão:

$$q_s = \sum_{\beta} I_{\alpha\beta}^* (A F_h F_f F_g F_w g_{\perp})_{n\beta} \quad (W) \quad 18)$$

Em termos de RCCTE, este termo é calculado tendo em conta como base o valor médio mensal, G_{sul} , para a estação de aquecimento:

$$Q_s = G_{sul} \sum_j \left[X_j \sum_n (A F_h F_f F_g F_w g_{\perp})_{nj} \right] M = G_{sul} \sum_j \left[X_j \sum_n (A_{snj})_{nj} \right] M \quad (kWh) \quad 19)$$

Onde:

G_{sul} – valor médio mensal da energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a sul de área unitária durante a estação de aquecimento (kWh/m^2);

X_j – fator de orientação, para as diferentes exposições;

A – área total do envidraçado (m^2);

A_{snj} – área efetiva coletora da radiação solar da superfície n que tem a orientação j (m^2);

g_{\perp} - fator solar do vão envidraçado;

F_{α} – fatores solares que têm em consideração a existência de eventuais obstáculos associados à transmissão da radiação solar para o interior do espaço útil através dos envidraçados;

M – duração média da estação convencional de aquecimento (meses).

Depois de se obter o valor dos ganhos térmicos brutos (Q_g), têm que se converter em ganhos térmicos úteis (Q_{gu}). Tal é conseguido através do fator de utilização dos ganhos térmicos (η), pela expressão seguinte:

$$Q_{gu} = \eta Q_g \quad (20)$$

O fator de utilização dos ganhos térmicos, η , calcula-se pelas expressões seguintes:

$$\begin{cases} \eta = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}} \\ \eta = \frac{a}{a + 1} \end{cases}$$

com:

$$a = \begin{cases} 1,8 - \text{edifícios com inércia térmica fraca} \\ 2,6 - \text{edifícios com inércia térmica média} \\ 4,2 - \text{edifícios com inércia forte} \end{cases}$$

2.2.3.2 Estação de arrefecimento

$$Nvc = \frac{Q_g}{A_p} \cdot (1 - \eta) \quad (kWh/m^2.ano) \quad (21)$$

em que $(1 - \eta)$ é o fator de utilização dos ganhos solares e internos na estação de arrefecimento, η_{arref} , A_p a área útil de pavimento da fração autónoma e Q_g o balanço entre os ganhos e perdas térmicas do edifício. Nesta situação a metodologia de cálculo é similar à utilizada no cálculo das necessidades de aquecimento. Então:

$$Q_g = Q_i + Q_s + Q_{opaco} \quad (kWh/ano) \quad (22)$$

Onde:

Q_i – ganhos internos (kWh);

Q_s – ganhos solares através dos vãos envidraçados (kWh);

Q_{opaco} – ganhos solares através da envolvente opaca, incluindo as pontes térmicas, que dizem respeito às perdas associadas aos elementos da envolvente exterior e por renovação de ar (kWh).

Cargas através da envolvente opaca exterior

Para se calcular estas cargas adota-se uma metodologia simplificada baseada na “temperatura ar-Sol” que se traduz da seguinte forma:

$$q_{opaco} = U.A. (\theta_{ar-sol} - \theta_i) = U.A. (\theta_{atm} - \theta_i) + U.A. \left(\frac{\alpha G}{h_e} \right) = \quad 23)$$

$$= U.A. (\theta_{atm} - \theta_i) + U.A. \left(\frac{\alpha I_{\alpha\beta}}{h_e} \right) \quad (W)$$

Onde:

θ_{ar-sol} – temperatura ar-Sol (°C);

α – coeficiente de absorção (para a radiação solar) da superfície exterior da parede;

$I_{\alpha\beta} \equiv G$ – intensidade de radiação solar instantânea incidente em cada orientação (W/m²);

h_e – condutância térmica superficial exterior do elemento da envolvente (W/m²°C).

Em termos de RCCTE podemos simplificar a equação, integrando os ganhos instantâneos ao longo dos 4 meses em causa (122 dias), da seguinte forma:

$$Q_{opaco} = 2,928. \sum U.A. (\theta_m - \theta_i) + \sum U.A. \left(\frac{\alpha I_r}{h_e} \right) = Q_{ext} + Q_{ar-sol} \quad (kWh) \quad 24)$$

Onde:

Q_{ext} – fluxo de calor devido à diferença de temperatura interior-exterior (kWh);

Q_{ar-sol} – ganhos solares pela envolvente opaca devidos à incidência da radiação solar $Q_{ar-sol} = UA(\alpha I_r/h_e)$ (kWh);

θ_m – temperatura média do ar exterior na estação convencional de arrefecimento na zona climática de Verão onde se localiza o edifício (°C);

I_r – intensidade média de radiação total incidente em cada orientação durante toda a estação de arrefecimento (kWh/m²).

Ganhos solares através dos vãos envidraçados

Estes ganhos instantâneos, q_s , devem ser determinados com a mesma expressão usada para o Inverno (ver atrás). Em termos de RCCTE será simplificada da seguinte forma:

$$Q_s = \sum_j \left[I_{rj} \sum_n (A F_h F_0 F_f F_g F_w g_{\perp})_{nj} \right] = \sum_j \left[I_{rj} \sum_n (A_{snj})_{nj} \right] \quad (kWh) \quad 25)$$

Onde:

A_{snj} – área efetiva coletora da radiação solar da superfície n que tem a orientação j (m²);

I_{rj} – intensidade da radiação solar incidente no vão envidraçado com a orientação j, na estação de arrefecimento (kWh/m²);

F_0 e g_0 – fatores solares.

Perdas por ventilação

A maneira de calcular estas perdas é igual à indicada para a estação de aquecimento:

$$q_v = 0,34R_{ph}V(\theta_i - \theta_{atm}) \quad (W) \quad 26)$$

Em termos de RCCTE estas perdas são estimadas da seguinte forma:

$$Q_v = 0,34[2,928R_{ph}V(\theta_m - \theta_i)] \quad (kWh) \quad 27)$$

Cargas internas

A metodologia é, mais uma vez, análoga à usada para a estação de aquecimento:

$$Q_i = 2,928 \cdot q_i \cdot A_p \quad (kWh) \quad 28)$$

O RCCTE considera ainda outras limitações a nível de necessidades energéticas, as Necessidades de Águas Quentes Sanitárias (Nac) e as Necessidades de Energia Primária (Ntc). Contudo neste trabalho essas limitações não serão consideradas pois os edifícios em estudo não possuem águas quentes sanitárias.

Para terminar esta abordagem aos regulamentos em vigor em Portugal, o âmbito de aplicação dos mesmos, que terá alguma relevância ao longo deste trabalho, está sintetizado na tabela seguinte.

Tabela 2.1 - Resumo da aplicação dos regulamentos RSECE e RCCTE

Novos edifícios		Regulamento aplicável
Habitação	sem sistemas de climatização ou $P \leq 25$ kW	RCCTE
	com sistemas de climatização $P > 25$ kW	RCCTE + RSECE
Serviços	pequenos edifícios sem sistemas de climatização ou $P \leq 25$ kW	RCCTE
	pequenas áreas: $< 1000 - 500$ m ² todos os edifícios com $P > 25$ kW	RSECE
	Grandes áreas: $> 1000 - 500$ m ² todos os edifícios	RSECE
Edifícios Serviços Existentes		Procedimentos
Grandes áreas: > 1000 m ² ou 500 m ²		Auditoria energética e QAI

2.3 Simulação dinâmica – Norma *ASHRAE 140-2004*

A simulação dinâmica é um método e análise computacional do perfil e consumos energéticos do edifício. Esta simulação obriga a um levantamento exaustivo de campo do ponto de vista da envolvente, dos equipamentos, da iluminação, da ocupação, dos sistemas de climatização, do tratamento de ar e dos horários de funcionamento. É também importante fazer algumas medições de ar novo bem como verificar a eficiência dos equipamentos de climatização.

A simulação dinâmica pode ser dividida em duas partes: simulação real e simulação nominal. A simulação real tem como objetivo a calibração do modelo computacional através da comparação entre os consumos energéticos reais, conseguidos através de contagens/medições feitas no local, com os consumos obtidos numericamente, validando o modelo sempre que a diferença entre eles seja inferior a 10%. Depois desta validação precede-se à simulação nominal onde se mantém parte das características reais do edifício (envolvente, sistemas de climatização e iluminação), substituindo os horários, ocupação, temperaturas interiores, densidades de equipamento e caudais de ar novo imposto pelos valores nominais do regulamento para aquele tipo de espaço.

A *ASHRAE* (*American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*) introduziu um programa rigoroso de testes e validação de vários programas, de modo a conseguir avaliar o rigor de cada um, através da identificação de diferenças nos resultados obtidos através dos diferentes algoritmos envolvidos, limitações e erros de código [8].

Como resultado deste programa de testes, surgiu uma lista de programas acreditados por esta norma, tais como: *BLAST*, *DOE-2*, *TRNSYS*, *TRACE 700* e *Energyplus*.

2.4 Programas de simulação dinâmica detalhada

A simulação dinâmica detalhada possibilita uma análise multizona do desempenho energético do edifício, por outras palavras, permite que sejam simuladas simultaneamente zonas diferentes do edifício. No âmbito do RSECE, este é o tipo de simulação que tem de se utilizar para grandes edifícios na determinação das necessidades energéticas e potências dos sistemas de climatização [5].

É nesta fase que é preciso escolher o programa, acreditado pela norma *ASHRAE 140-2004*, que vai ser utilizado durante o trabalho para ser comparado com o programa de simulação simplificada *RCCTE-STE*. Após um estudo das inúmeras escolhas existentes no mercado, foi selecionado o programa *Cypeterm* que integra o *Energyplus* como motor de cálculo.

2.4.1 RCCTE-STE

Define-se como um programa de simulação dinâmica simplificada, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI) para verificação do RCCTE e RSECE. Permite calcular o consumo de energia de um edifício bem como simular a potência máxima requerida para um sistema de climatização.

Este programa baseia-se numa simulação horária anual de um espaço tipo monozona. No entanto, pode ser também considerado como simulação detalhada multizona desde que aplicado isoladamente a cada zona diferente de um edifício e os respetivos resultados sejam devidamente adicionados para obter o desempenho energético global do edifício [5].

Segundo o Decreto-Lei n.º 79/2006 o programa baseia-se num circuito de analogia reo-elétrica tal como representado no diagrama seguinte:

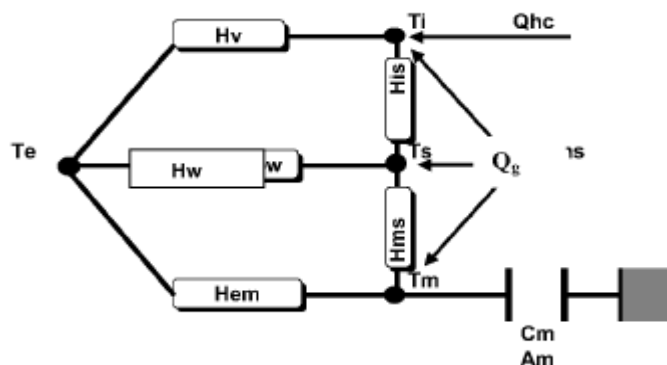


Figura 2.2 - Circuito de analogia reo-elétrica do programa RCCTE-STE [5]

Este modelo incorpora uma base interna de dados climáticos para todos os concelhos de Portugal em consonância com a divisão climática do país para efeitos de aplicação do RCCTE e RSECE [10].

Os nós deste modelo representam:

- T_e – temperatura exterior;
- T_i – temperatura interior;
- T_s – temperatura média nas superfícies interiores da envolvente;
- T_m – temperatura média da massa térmica dos elementos do espaço.

As resistências indicam a transferência de calor correspondente a:

- H_v – trocas de ar;
- H_w – condução de calor através dos vãos envidraçados (elementos sem massa térmica);
- H_{em} – condução de calor através da envolvente opaca, sem ter em conta o efeito da radiação solar incidente;
- H_{is} – trocas radiativas e convectivas entre as superfícies da envolvente interior;
- H_{ms} – transferência de calor entre a massa de armazenamento térmica e a superfície.

Este método realiza um balanço dinâmico do espaço contabilizando, em cada hora, as diferenças entre as perdas e os ganhos térmicos, pelos vãos envidraçados e pela envolvente opaca, bem como os ganhos internos, ventilação e energia armazenada na massa térmica em cada momento concentrada no nó T_m :

$$Q_{hc} = Q_v + Q_w + Q_{em} + Q_g \quad (W) \quad 29$$

No diagrama estes fluxos e resistências térmicas estão representados e têm o seguinte significado:

Q_{hc} - energia necessária para climatização (aquecimento e arrefecimento resultante do balanço horário do espaço);

Q_v - ganhos ou perdas de calor correspondentes à renovação do ar;

Q_w – ganho ou perda de calor correspondente às trocas de calor por condução através dos vãos envidraçados;

Q_{em} – ganho ou perda de calor correspondente às trocas de calor por condução através da envolvente opaca;

Q_g – ganhos internos instantâneos (ocupação, iluminação e equipamentos), ganhos solares através dos envidraçados e ganhos solares através da envolvente opaca, tendo em conta o efeito da inércia térmica do espaço.

2.4.2 Cypeterm

O *Cypeterm* é um programa desenvolvido para Portugal especificamente para dar resposta ao projeto de verificação das características de comportamento térmico dos edifícios de acordo com o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (Decreto-Lei n.º80/2006), Nota Técnica NT-SCE-01 (Despacho n.º 11020/2009) e Perguntas e Respostas publicadas pela ADENE. Este programa realiza o cálculo com base na modelação tridimensional dos edifícios de forma gráfica. Fornece ainda as listagens e desenhos segundo o RCCTE e

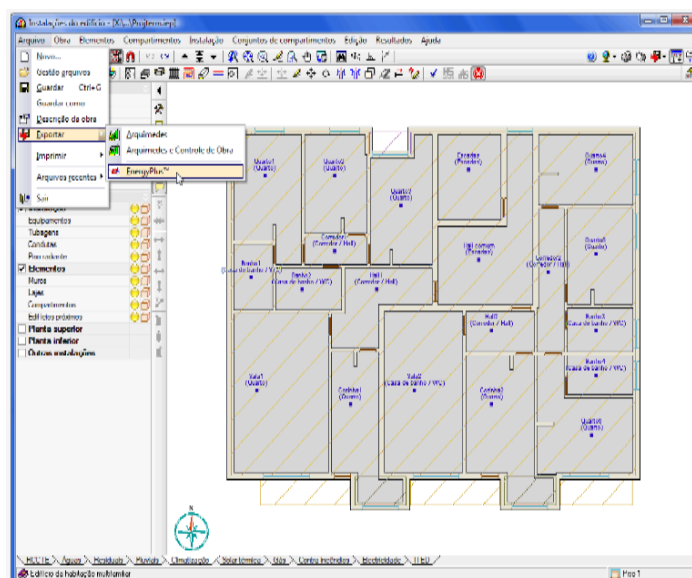


Figura 2.3 - Ambiente de trabalho do *Cypeterm*

2.4.3 Energyplus

programas existentes na altura, o BLAST e o DOE-2, e ainda houve introdução de novas funcionalidades.

Este programa é constituído por vários módulos internos, que permitem facilitar a organização dos dados de entrada bem como uma mais fácil introdução futura de mais opções de cálculo. A figura 2.4 apresenta a estrutura do *Energyplus* e os módulos utilizados na simulação do comportamento energético.

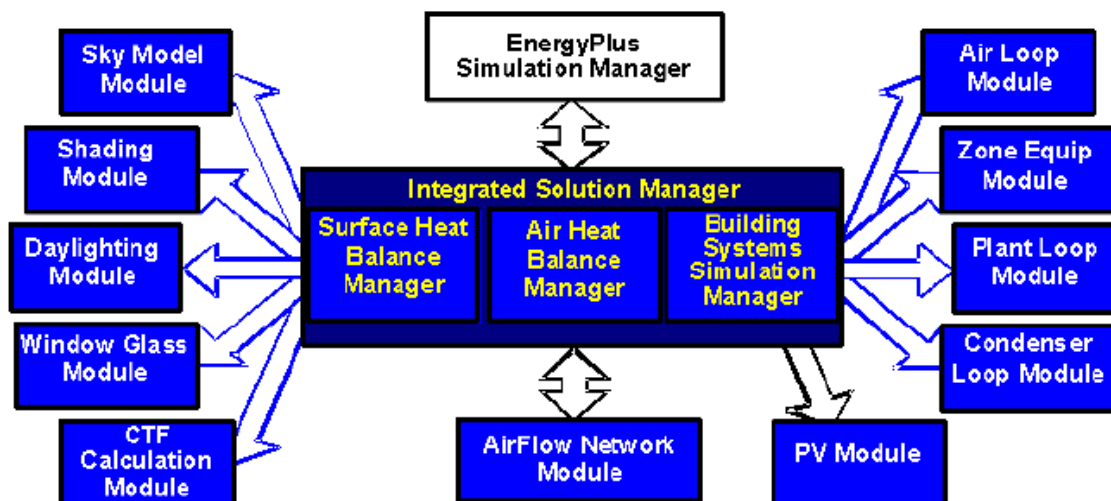


Figura 2.4 - Esquema simplificado do funcionamento modular do Energyplus [1]

O *EnergyPlus*, embora tenha um ambiente gráfico pouco atrativo, possui diversas capacidades que o tornam bastante útil, de entre as quais se destacam o sistema modular que permite definir várias zonas e, de forma diferenciada, a infiltração ou os ganhos internos para cada zona. O programa oferece ainda a possibilidade de fornecer os dados resultantes da simulação hora a hora, no entanto, o utilizador pode optar por intervalos mais reduzidos. O cálculo das necessidades energéticas de um determinado edifício é realizado pelo *EnergyPlus* a partir dos dados inseridos pelo utilizador (materiais da envolvente, sistemas de climatização, dados relativos à geometria) recorrendo a um ficheiro de dados climáticos do local de implantação e gerando o balanço energético com recurso aos diferentes módulos que constituem o programa.

3. Caso de Estudo Monozona

3.1 Caracterização do Edifício Monozona

Para se realizar a comparação entre os programas RCCTE-STE e *Cypeterm* foi escolhido um edifício monozona com uma arquitetura o mais simples possível. Visto que se quer perceber o funcionamento e as diferenças entre os dois programas selecionados, bem como compreender as respostas energéticas quando algumas características do edifício são alteradas, não seria necessário realizar um estudo de um edifício real e complexo. O edifício em causa, designado por edifício monozona, terá uma forma retangular com uma cobertura horizontal. O edifício terá as paredes de menor dimensão voltadas a Este e Oeste as paredes de maior dimensão voltadas a Norte e Sul. Todas estas paredes terão vãos envidraçados e pilares de suporte como será explicado posteriormente.

O edifício monozona encontra-se isolado, ou seja, não existe qualquer outro edifício em contacto ou perto do mesmo. Portanto não vai existir qualquer tipo de sombreamento provocado por edifícios vizinhos ou por vegetação. No que diz respeito ao interior e à ocupação do edifício, como o próprio nome indica, será considerado um edifício de escritórios que funcionará em *open-space*.

3.1.1 Localização e Zona Climática do Edifício

O edifício irá estar situado no concelho de Lisboa, mais concretamente no Parque das Nações (ver figura 3.1). A distância deste local ao litoral é de aproximadamente 20 km e a altitude será de 50 metros.



Figura 3.1 - Localização geográfica do edifício monozona

O edifício encontra-se na periferia de uma zona urbana ou numa zona rural e estará também, numa zona abrangida por gás natural.

De acordo com o RCCTE, o país encontra-se dividido em três zonas climáticas de Inverno (I_1 , I_2 , I_3) e em três zonas climáticas de Verão (V_1 , V_2 , V_3). No quadro III.1 do RCCTE está presente a distribuição dos concelhos de Portugal segundo as zonas climáticas referidas. Como já referido o edifício encontra-se no concelho de Lisboa, portanto segundo o quadro mencionado, está numa zona climática classificada como I_1/V_2 . Na tabela seguinte encontram-se as zonas climáticas referidas assim como outros dados climáticos que serão posteriormente utilizados neste trabalho.

Tabela 3.1 - Dados climáticos para o concelho de Lisboa

Concelho	Zona climática de Inverno	Número de graus dias (GD) (°C.dias)	Duração da estação de aquecimento (meses)	Zona climática de Verão	Temperatura externa do projeto (°C)	Amplitude térmica (°C)
Lisboa	I_1	1190	5,3	V_2	32	11

3.1.2 Estrutura do Edifício

O edifício monozona tem uma área útil de 600 m² e um formato retangular com dimensões de 30 m x 20m.

Este edifício, como qualquer outro terá que ter uma estrutura de suporte da construção. Essa estrutura será composta por vários elementos como sapatas de suporte, pilares, viga térrea e viga de topo. As sapatas de suporte estão enterradas debaixo do solo e sobre cada uma está assente um pilar. A viga térrea irá definir o perímetro, sendo que sobre ela irão assentar os pilares e as paredes. A viga de topo irá fazer a ligação entre os pilares no topo do edifício e é sobre ela que será aplicada a cobertura.

Assim, a estrutura do edifício monozona está assente em sapatas com 1 m² de área onde apoiam os pilares de secção quadrada com aresta de 0,15 m. Os pilares estão a uma distância de 5 m entre si e tanto a viga térrea como a viga de topo terão 0,30 m de altura. O edifício apresenta um pé direito de 3 m e terá uma cobertura horizontal do tipo terraço invertido. Neste primeiro caso de estudo, para simplificar o mais possível a entrada de dados nos dois programas, não foram considerados pilares interiores.

A planta do edifício foi desenhada toda ela em *Autodesk AutoCAD* 2014 pois o programa *Cypeterm* utilizado neste estudo funciona com base em desenhos com extensão .DWG. Todos estes desenhos e mais alguns pormenores relevantes encontram-se no Anexo A.

3.1.3 Caracterização dos elementos da envolvente

A caracterização térmica da envolvente do edifício foi feita com base na publicação Coeficiente de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios (versão atualizada 2006) [14] e no Decreto-Lei nº. 80/2006 [6].

3.1.3.1 Paredes Exteriores

Sendo que o edifício é considerado um *open-space*, as únicas paredes existentes são as paredes exteriores. Na figura 3.2 pode ser observada a disposição dos elementos na parede.

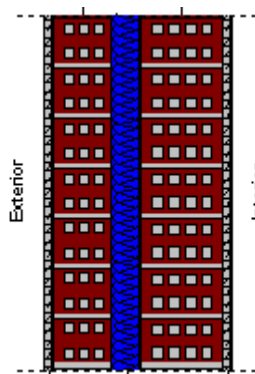


Figura 3.2 - Pormenor da Parede Exterior

Como se pode constatar através da figura esta parede é dupla com isolamento preenchendo totalmente a caixa-de-ar, e ambas as superfícies estão revestidas a reboco tradicional. O pano de alvenaria que se situa do lado exterior será o tijolo de 11 e do lado interior será o tijolo de 15. O isolamento que terá uma espessura de 5 cm será o usual poliestireno extrudido em placas, mais conhecido por XPS. O acabamento final das paredes será, tanto no interior como no exterior, reboco tradicional com uma espessura de 1,5 cm. Esta parede será de cor clara e terá uma espessura total de 34 cm.

As propriedades térmicas da parede e todos os seus constituintes já referidos poderão ser consultados nos anexos em forma de tabela, que serviu de base para o cálculo do coeficiente global de transmissão térmica da mesma, U_{parede} . Desse cálculo resulta:

$$U_{parede} = 0,44 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

3.1.3.2 Pavimento

O pavimento do edifício está na sua totalidade em contacto com o solo. O mesmo é isolado em toda a área com o material isolante XPS. O revestimento interior (0,75 cm), que será em acrílico, será aplicado sobre uma camada de argamassa (4 cm) que por sua vez está assente numa camada de areia (4 cm). Será sob a areia que estará o isolante (6 cm), estando este sobre a laje de betão (15 cm) que se encontra imediatamente acima do solo. Na figura 3.3 pode ser observada a disposição dos elementos constituintes do pavimento.

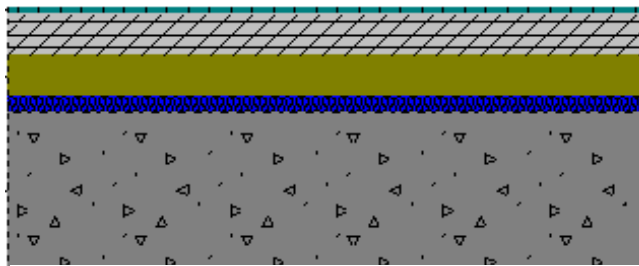


Figura 3.3 - Pormenor do Pavimento

Tal como para as paredes, a tabela com as características térmicas de todos os constituintes está inserida nos anexos para poder ser consultada. Com o auxílio dessa tabela chega-se ao seguinte coeficiente U:

$$U_{pavimento} = 0,55 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

3.1.3.3 Cobertura

A cobertura adotada para este edifício vai ser um terraço invertido, constituído por uma camada superficial de brita (2 cm), por um isolante do mesmo tipo utilizado nas paredes (7 cm) que se encontra assente numa placa de betão (20 cm). O revestimento interior utilizado será reboco tradicional (2 cm). A espessura total da cobertura será de 31 cm. Na figura seguinte pode ser vista a disposição dos elementos da cobertura.

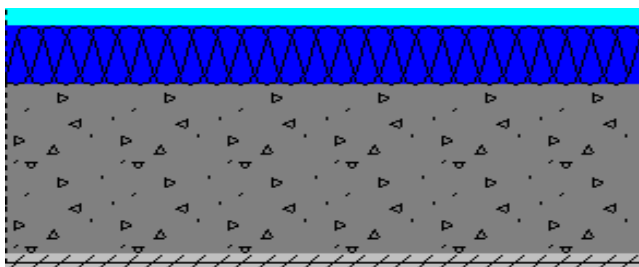


Figura 3.4 - Pormenor da Cobertura

Assim como nos casos anteriores, encontra-se em anexo a tabela com as características térmicas dos constituintes deste elemento da envolvente. No entanto como se trata de um elemento horizontal, o valor do coeficiente global de transmissão térmica, U , vai ser diferente para a estação de aquecimento e arrefecimento. Isto sucede porque a resistência térmica interior muda consoante a estação. Na tabela seguinte, que se pode encontrar no RCCTE, observam-se os valores dessas resistências para as diferentes estações.

Tabela 3.2 - Valores das resistências térmicas superficiais

Sentido do fluxo de calor	Resistência térmica superficial ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$)	
	Exterior - R_{se}	Interior - R_{si}
Ascendente (Estação de aquecimento)	0,04	0,10
Descendente (Estação de arrefecimento)	0,04	0,17

Nesta situação, o cálculo do coeficiente global de transmissão térmica será feito de forma análoga ao efetuado nos elementos anteriores, só que levará a obter dois valores diferentes para as duas estações de referência.

Tabela 3.3 - Valores do coeficiente global de transmissão térmica da cobertura

Estação	$U_{\text{cobertura}}$ ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{C}$)
Aquecimento	0,46
Arrefecimento	0,45

3.1.4 Pontes Térmicas

As pontes térmicas são zonas da envolvente dos edifícios que apresentam menor resistência térmica que os restantes elementos que constituem a envolvente dos mesmos, originando perdas mais elevadas do que as verificadas na zona corrente da envolvente. Podemos classificar as pontes térmicas em planas e lineares.

As pontes térmicas planas sucedem devido a heterogeneidades inseridas na zona corrente da envolvente, isto é, locais onde se verifica uma alteração na composição estrutural do elemento construtivo (como por exemplo, um pilar ou uma coluna numa parede). A ponte térmica é quantificada multiplicando o valor de coeficiente de transferência térmica pela área.

No presente edifício, existem pontes térmicas planas, que são constituídas por um pano de tijolo de 11 cm, um isolamento térmico XPS (5 cm), um pilar de betão (15 cm) e revestida tanto exteriormente como interiormente por reboco tradicional (1,5 cm). Na figura seguinte pode ser observada a disposição dos elementos da respetiva ponte térmica plana.

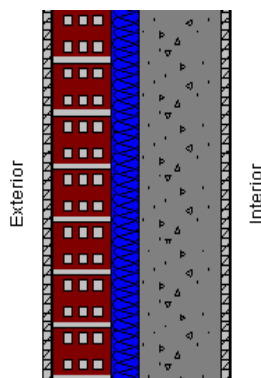


Figura 3.5 - Pormenor da PTP

A tabela com as características térmicas de todos os constituintes está inserida nos anexos para poder ser consultada. Com o auxílio dessa tabela chega-se ao seguinte coeficiente U:

$$U_{PTP} = 0,53 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Em relação às pontes térmicas lineares, correspondem à ligação de dois elementos construtivos exteriores e são singularidades da envolvente, em que o fluxo térmico é bidimensional ou tridimensional, assimiladas a uma perda térmica por unidade de comprimento. Este tipo de ponte térmica é quantificado multiplicando o valor de coeficiente de transferência térmica linear (Ψ) pelo desenvolvimento. Os coeficientes de transmissão térmica linear são obtidos através das tabelas IV.2.1, IV.2.2, IV.2.3 do RCCTE. No caso do edifício deste estudo as pontes térmicas lineares serão apresentadas mais a frente, como resultado da simulação, pois o programa *Cypeterm* utilizado nesta dissertação tem a capacidade de realizar o cálculo automático das mesmas.

3.1.5 Inércia Térmica

O conceito de inércia térmica corresponde à capacidade de um elemento armazenar calor e só libertá-lo ao fim de certo tempo. A inércia térmica pode ser utilizada para absorver os ganhos de calor durante o dia, reduzindo assim a carga de arrefecimento, e libertá-los à noite, reduzindo a carga de aquecimento. Esta capacidade de armazenar calor depende dos elementos construtivos, do calor específico e também da sua condutibilidade térmica.

A inércia térmica depende da massa superficial útil por metro quadrado de área de pavimento (I_t) e é calculada pela seguinte expressão:

$$I_t = \frac{\sum M_{si} \times S_i}{A_p} \quad 30)$$

Em que:

M_{si} – massa superficial útil do elemento i (kg/m^2);

S_i – área da superfície interior do elemento i (m^2);

A_p – área útil de pavimento (m^2).

Segundo o valor encontrado para I_t definem-se três classes de inércia de acordo com a tabela seguinte:

Tabela 3.4 - Classe de inércia térmica interior segundo o RCCTE

Classe de inércia	Massa superficial útil por metro quadrado da área de pavimento (kg/m^2)
Fraca	$I_t < 150$
Média	$150 \leq I_t \leq 400$
Forte	$I_t > 400$

A classe de inércia do edifício em causa, cujo cálculo detalhado se apresenta em anexo, é média.

3.1.6 Vãos Envidraçados

Assim como nos elementos da envolvente, também nos vãos envidraçados se pretende uma solução o mais simples possível de modo a não complicar a entrada de dados nos diferentes programas. Portanto, os vãos envidraçados escolhidos têm uma caixilharia de plástico, vãos simples e vidro duplo incolor com lâmina de ar de 16 mm. Interiormente os envidraçados serão protegidos por cortinas muito transparentes, enquanto na estação de arrefecimento utilizam-se estores venezianos de lâminas de madeira. No que diz respeito ao coeficiente global de transmissão térmica, para o edifício deste estudo toma o seguinte valor:

$$U_{\text{vão envidraçado}} = 2,7 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

No estudo dos envidraçados, para além do coeficiente global de transmissão térmica, U , é determinante conhecer o fator solar desses envidraçados. Esse valor é, naturalmente, dependente do vão ser simples ou duplo e do material que o constitui. Assim para o edifício em estudo esse fator será:

$$g_{\text{vidro}} = 0,63$$

Como foi referido atrás, na estação de arrefecimento é considerada com proteção, portanto é determinante conhecer qual o fator solar da mesma. Neste caso, para o estores venezianos de lâminas de madeira tem-se que:

$$g_{\text{protecção 100\%}} = 0,08$$

Já se percebeu que o fator solar do vão envidraçado não é constante ao longo do ano. Nas expressões seguintes verifica-se como o fator solar das respetivas estações se determina:

$$g_{\text{Inverno}} = g_{\text{vidro}}$$

$$g_{\text{verão}} = (0,3 \times g_{\text{vidro}}) + (0,7 \times g_{\text{protecção 100\%}})$$

Logo os fatores solares do edifício monozona serão:

$$g_{\text{Inverno}} = 0,63$$

$$g_{\text{verão}} = 0,25$$

3.1.7 Caracterização do funcionamento do edifício monozona

Para os parâmetros de funcionamento do edifício foram selecionados os valores de referência do RSECE para gabinetes de escritório. Assim sendo na tabela seguinte apresenta-se uma síntese desses valores.

Tabela 3.5 - Síntese dos parâmetros de funcionamento do edifício mo

	Valor	Unidades
Densidade de Ocupação	15	m ² /ocupante
Densidade de Iluminação	8	W/m ²
Densidade de Equipamento	15	W/m ²
Ventilação	35	m ³ /h.ocupante
Temperatura de referência:		
Inverno	20	°C
Verão	25	°C

Em anexo podem ser consultados os perfis de ocupação, iluminação, equipamento e ventilação.

3.2 Simulação Cypeterm/Energyplus

Depois da breve descrição, no capítulo 2, do método de funcionamento dos programas utilizados e de todas as especificações do edifício que serão necessárias para efetuar a simulação desejada, estão reunidas as condições para que a mesma se inicie.

O primeiro passo para a criação de uma obra neste programa passa por descrever o edifício. Assim sendo, nesta fase são preenchidas as seguintes informações:

- Tipo de edifício: lojas e escritórios;
- Localização: Lisboa;
- Altitude: 40 m;
- Exposição ao vento: região A;
- Rugosidade: periferia de uma zona urbana ou numa zona rural;
- Proteção contra o vento: média;
- Pé direito: 3m;
- Definição da orientação.

No segundo passo começa-se por definir o pé direito e o número de pisos que se pretende para o edifício em estudo. De seguida é mais cómodo utilizar um ou vários ficheiros DWG (ficheiros *Autodesk Autocad*) que serviram de máscaras para introduzir a envolvente. Já com as máscaras inseridas basta seleccionar o elemento que se pretende introduzir, como parede exterior, cobertura, pavimento ou envidraçados, e definir a sua constituição. Para tal, o programa contém uma biblioteca de materiais e elementos da publicação do LNEC – ITE50 [12], que permite economizar bastante o tempo em termos de introdução de dados.

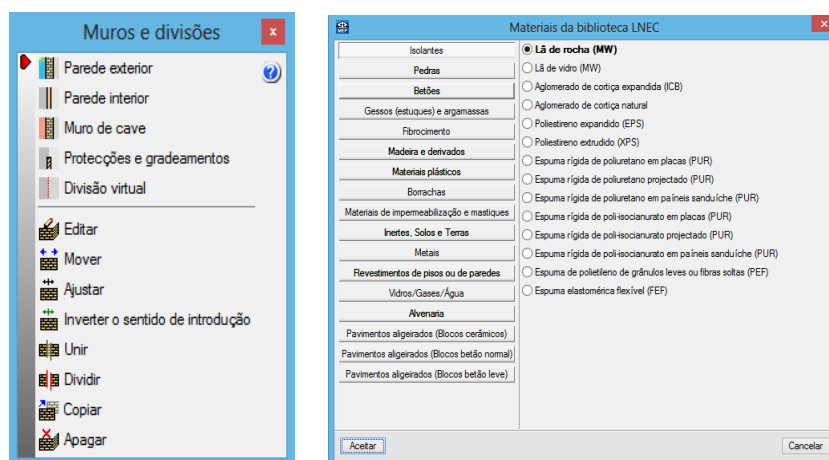


Figura 3.6 - Introdução de dados no *Cypeterm*

Após a introdução de todos os elementos de construção poderemos obter uma visualização em três dimensões do edifício projetado.

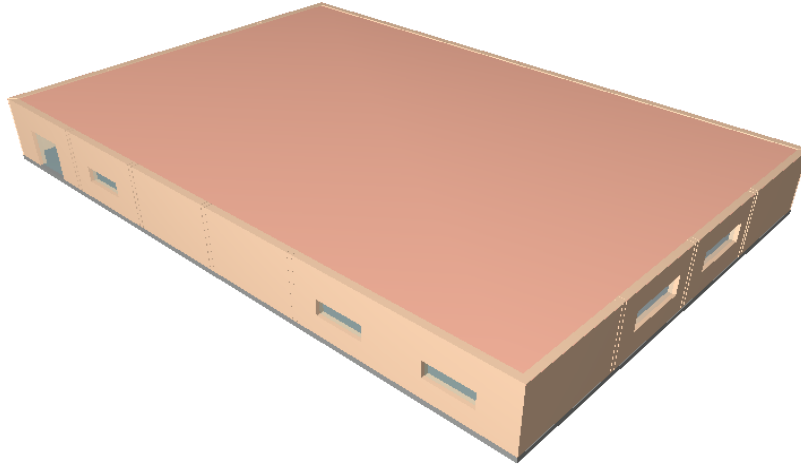


Figura 3.7 - Vista 3D do edifício monozona

De seguida passa-se à definição do tipo de compartimento presente neste edifício. Neste ponto é possível definir os seguintes parâmetros de projeto:

- Parâmetros de cálculo para o estudo térmico: habitável;
- Parâmetros de cálculo para o estudo climático: climatizado;
- Condições:
 - Temperatura de verão: 25°C;
 - Temperatura de inverno: 20°C;
 - Humidade relativa: 50%;
- Ocupação:
 - Número de pessoas: 15 m²/ocupante;
 - Tipo de atividade: empregado de escritório;
- Iluminação:
 - Potência: 8 W/m²;
 - Tipo: incandescente²;
- Ventilação: 3000 m³/h (por compartimento);
- Outras cargas: 15 W/m².

² Foi escolhido este tipo de iluminação pois, infelizmente o programa não tinha a opção *led*.

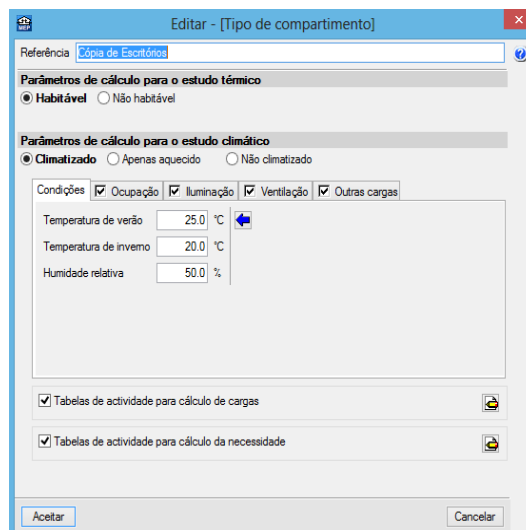


Figura 3.8 - Definição do tipo de compartimento no *Cypeterm*

É ainda na edição do compartimento que é possível inserir os perfis de utilização quer para o cálculo das necessidades quer para o cálculo das cargas. Como referido em 3.1.7 os perfis utilizados encontram-se no anexo F.

Para finalizar a inserção de dados no programa falta apenas definir a fração autónoma. É aqui que o utilizador define os dias de utilização, as necessidades AQS e as cargas internas da fração. Ficou aqui também definido que o edifício estaria encerrado dois dias por semana. Em relação às AQS, o seu consumo não será considerado, como já referido anteriormente neste trabalho.

Os sistemas seleccionados para aquecimento e arrefecimento foram a bomba de calor. Define-se o valor da eficiência nominal do equipamento para aquecimento (4) e o fator de conversão (0,29 kgep/kWh). Para o arrefecimento define-se o valor da eficiência nominal do equipamento (3) enquanto o fator de conversão é o mesmo que para o equipamento de aquecimento.

Por último estabelece-se que a ventilação é do tipo natural e que está conforme a norma NP 1037-1, como se pode constatar na figura 3.9.

Figura 3.9 - Definição dos parâmetros da fracção autónoma no *Cypeterm*

3.2.1 Resultados

3.2.1.1 Verificação do RCCTE

Após todos os dados introduzidos basta carregar na tecla “Resultados” para obter os resultados pretendidos. O que o programa começa por fazer é verificar o cumprimento das exigências do RCCTE, apresentando uma ficha com resultados, tais como as necessidades nominais de aquecimento (N_{ic}), necessidades nominais de arrefecimento (N_{vc}), inércia térmica, entre outros. Na tabela seguinte estão presentes alguns desses resultados, que posteriormente serão utilizados para comparação com os valores obtidos através do programa RCCTE-STE.

Tabela 3.6 - Resultados do *Cypeterm*, necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento

	N_{ic} - Necessidades Nominais de Aquecimento (kWh/m ² .ano)	N_i – Valor limite das necessidades nominais de aquecimento (kWh/m ² .ano)	N_{vc} - Necessidades Nominais de Arrefecimento (kWh/m ² .ano)	N_v – Valor limite das necessidades nominais de arrefecimento (kWh/m ² .ano)
Edifício monozona	23,79	51,51	21,94	32

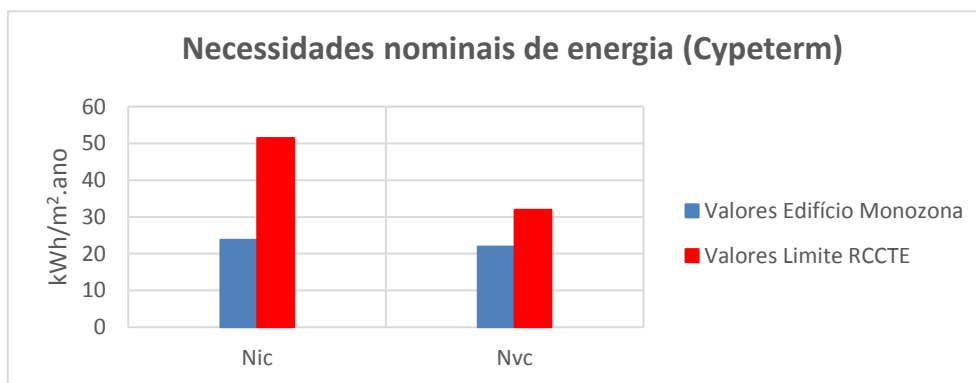





Figura 3.10 - Comparação entre as necessidades nominais de energia e os valores limite

Como o regulamento preconiza, para um edifício se encontrar regulamentar, os valores de Nic e Nvc tem que ser menores que os seus valores limite, Ni e Nv, respetivamente. Nesse sentido o edifício encontra-se regulamentar como se pode constatar no gráfico anterior. Comparando também, os valores obtidos para o edifício em estudo com os seus valores limite, é possível prever que o mesmo será energeticamente eficiente pois ainda existe uma boa margem entre ambos os valores.

3.2.1.2 Pontes Térmicas Lineares

Como mencionado atrás neste trabalho, o *Cypeterm* tem a capacidade de calcular automaticamente as pontes térmicas lineares existentes no edifício. Assim, na tabela seguinte são apresentadas todas as pontes térmicas lineares determinadas pelo programa.

Tabela 3.7 - Pontes térmicas lineares existentes no edifício em estudo fornecidas pelo *Cypeterm*

Tipo de Ponte Térmica Linear		Comprimento (m)	Ψ (W/(m.°C))
	Ligação da fachada com pavimentos térreos	100	0,49
	Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço	100	0,64
	Ligação entre duas paredes verticais	12	0,11

3.2.1.3 Necessidades energéticas ao longo do ano

Depois de verificado o cumprimento das exigências do RCCTE e de analisadas as pontes térmicas lineares apresentadas pelo programa, segue-se a exportação de dados para o *EnergyPlus*. Com esta exportação consegue-se aproveitar todos os dados introduzidos no *Cypeterm* evitando, assim, o trabalho exaustivo e demorado que leva a introdução de dados através de valores numéricos no *Energyplus*. Deve-se referir, ainda, que esta exportação não obriga o utilizador a instalar no computador nenhum programa para além do *Cypeterm*.

O primeiro passo após a exportação, já no “ambiente *Energyplus*”, passa por seleccionar o ficheiro climático indicado, ou seja, da cidade onde se localiza o edifício (que neste caso é Lisboa). O programa já vem de origem com alguns ficheiros de algumas capitais de todo mundo, contudo é possível escolher outros descarregando-os da internet. Neste estudo utilizou-se um ficheiro fornecido pelo INETI para Lisboa, convertido a partir de um ficheiro do *Solterm*. Mais à frente, será explicado com maior detalhe esta questão.

Após realizada a exportação, é possível visualizar no ecrã as necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento mensal de todos compartimentos (neste caso apenas um) bem como o seu total. Ainda se consegue também, obter a carga térmica de aquecimento para o compartimento seleccionado, para um dia seleccionado do ano e de arrefecimento para outro dia. Escolheu-se para estudar a carga térmica de aquecimento, o dia 31 de Janeiro que é o dia do ano com maior necessidade de aquecimento, enquanto para estação de arrefecimento seleccionou-se o dia 29 de Agosto, que é o dia com maior necessidade de arrefecimento. Estes dias variam, naturalmente, com o ficheiro climático que se está a utilizar.

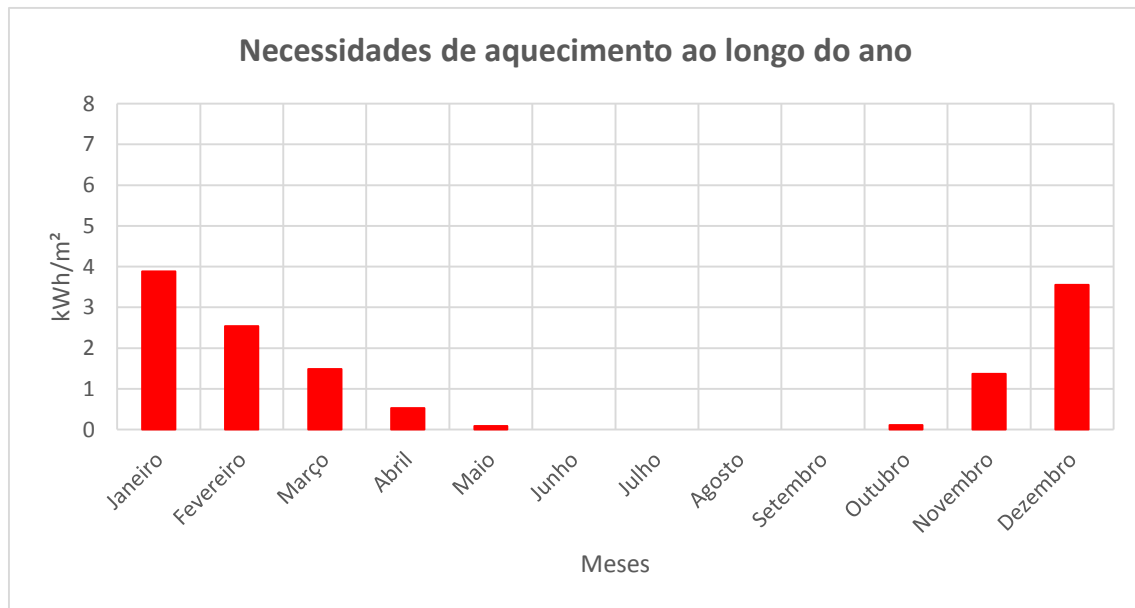
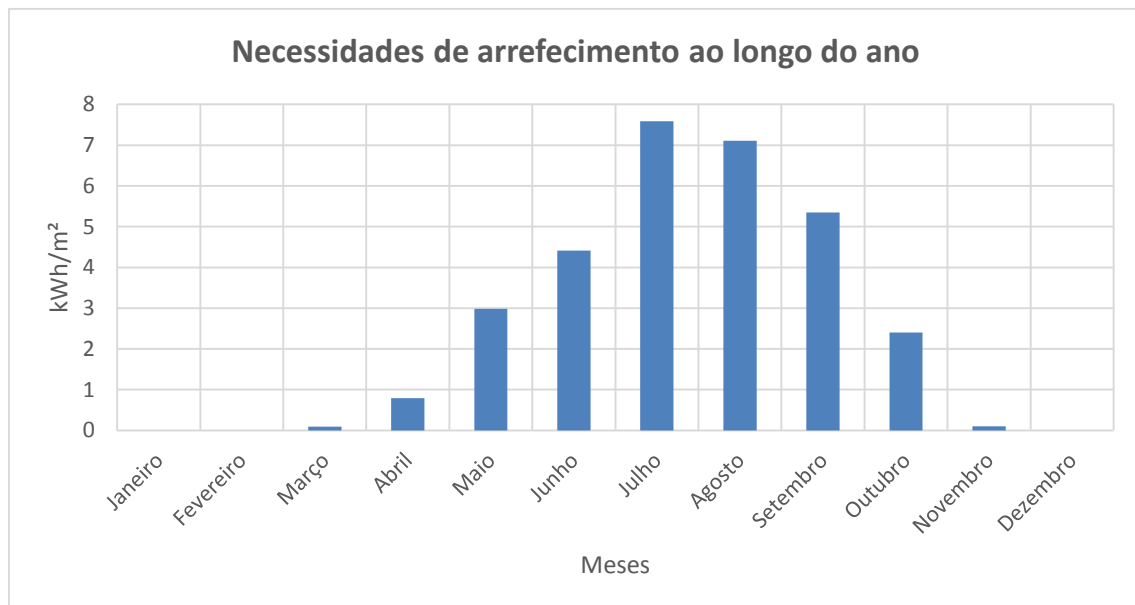
Posto isto, de seguida, serão apresentadas as necessidades térmicas de aquecimento e arrefecimento ao longo do ano.

Tabela 3.8 - Necessidades de aquecimento ao longo do ano fornecidas pelo *Cypeterm*

	Meses (kWh/m²)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Edifício monozona	3,88	2,54	1,49	0,53	0,09	-	-	-	-	0,11	1,37	3,55	13,56

Tabela 3.9 - Necessidades de arrefecimento ao longo do ano fornecidas pelo *Cypeterm*

	Meses (kWh/m ²)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Edifício monozona	-	-	0,09	0,79	2,98	4,41	7,59	7,11	5,35	2,4	0.1	-	30,84

**Figura 3.11** - Necessidades de aquecimento do edifício monozona**Figura 3.12** - Necessidades de arrefecimento do edifício monozona

3.2.1.4 Cargas térmicas

Define-se carga térmica de aquecimento/arrefecimento como a potência mínima que o sistema de AVAC tem que possuir para garantir o conforto térmico de toda a área útil considerada. O cálculo das cargas térmicas na estação de aquecimento é realizado considerando as piores condições possíveis, ou seja, com base no dia do ano em a temperatura exterior seja a mais baixa. Já na estação de arrefecimento esse cálculo é efetuado com base no dia do ano em que a temperatura exterior seja mais alta. Assim, serão apresentadas de seguida, as cargas térmicas hora a hora para esses dias.

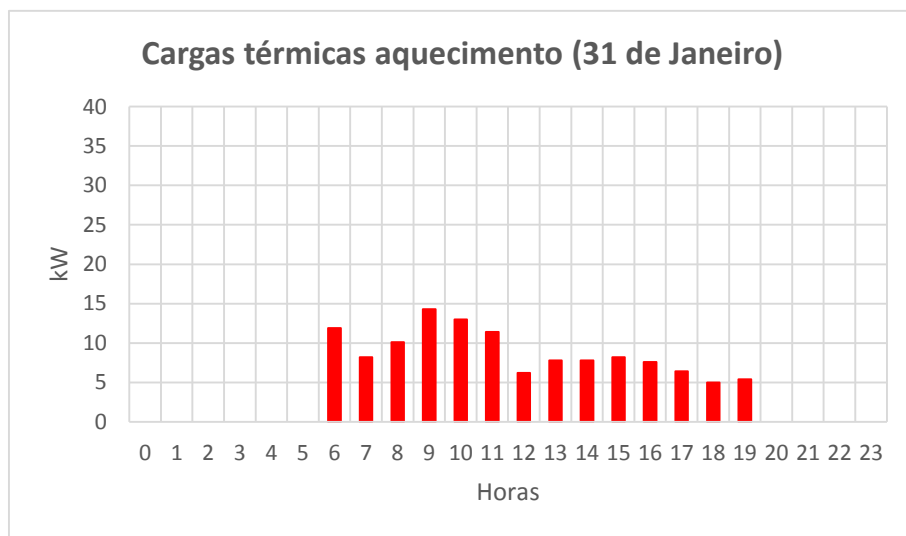


Figura 3.13 - Cargas térmicas de aquecimento hora a hora (31 de Janeiro)

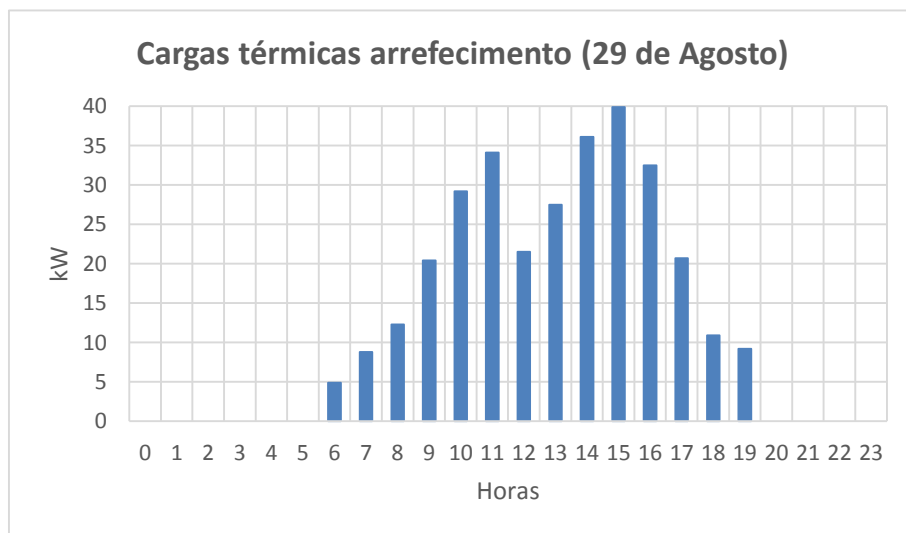


Figura 3.14 - Cargas térmicas de arrefecimento hora a hora (29 de Agosto)

3.3 Simulação RCCTE-STE

Já com a simulação dinâmica via *Cypeterm/EnergyPlus* efetuada para o edifício passa-se então para a simulação com o programa RCCTE-STE. O primeiro passo a realizar resume-se à introdução de dados relativos à localização e condições de utilização do espaço. De seguida é necessário definir as características gerais da fração autónoma, que neste caso é apenas uma pois o espaço funciona em *open-space*. É aqui que serão inseridas no programa dados como o tipo de ocupação, tipo de sistemas de ventilação, necessidades AQS e tipo de sistema de climatização bem como as suas potências.

Figura 3.15 - Introdução do tipo de sistema de climatização no RCCTE-STE

É importante salientar que, segundo o RSECE, para o mesmo ser aplicado, o edifício em estudo necessita de uma potência instalada superior a 25 kW. Contudo, como realizado também com o *Cypeterm* o primeiro a fazer é verificar o cumprimento das exigências do RCCTE. Nesse sentido tem que se definir para a potência instalada um valor que não exija a aplicação do RSECE, como por exemplo 15 kW. Optou-se também, pela bomba de calor como sistema de aquecimento e arrefecimento tal como na simulação já realizada.

É ainda na janela da fração da autónoma que se introduzem o dados dimensionais como o pé direito, a área útil e altura da fachada ao solo. Já com tudo preenchido dar-se-á início à caracterização das soluções de construção. Para além das características térmicas dos constituintes dos vários elementos de construção é também indispensável indicar qual a sua massa superficial, para que o cálculo da inércia térmica do edifício seja realizado com sucesso.

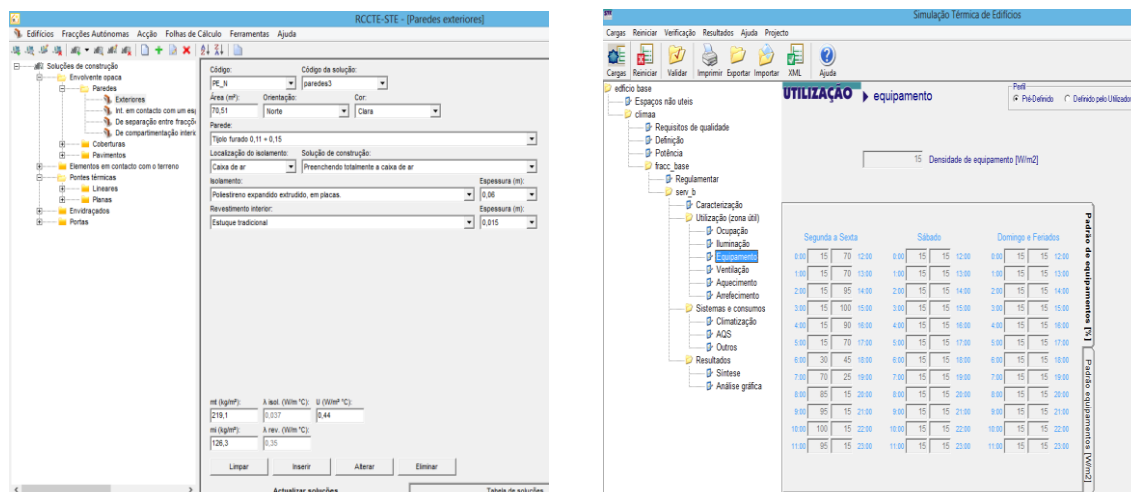


Figura 3.16 - Introdução de dados no RCCTE-STE e interface do STE

Em relação aos envidraçados a introdução de dados ocorre de forma semelhante aos elementos da envolvente, apenas se teve o cuidado em colocar os fatores solares dos vãos envidraçados iguais aos utilizados pelo programa *Cypeterm*. Nos anexos encontra-se uma tabela com esses valores. Com o edifício já todo definido basta escolher a opção “Verificar Regulamentos”, para o programa verificar se o edifício se encontra de acordo com o RCCTE e em caso afirmativo serão emitidas fichas com todos os resultados (tais como: Nic, Nvc, inércia térmica, etc.).

Uma vez que o edifício estudado já se encontra em situação regulamentar face ao RCCTE falta verificar em relação ao RSECE. Para isso basta impor um valor nas potências de aquecimento e arrefecimento superior a 25 kW como o regulamento preconiza. Tal consegue-se editando esses valores na janela da fração autónoma (figura 3.15) para os valores pretendidos (por exemplo 30 kW).

Nesta nova situação, ao “pedir” para o programa simular, este abre uma nova janela, o STE (Simulação Térmica de Edifícios). Nesta nova fase da simulação, podem ser definidos vários parâmetros, tais como: ocupação, iluminação, equipamento, ventilação, aquecimento e arrefecimento (por definição o programa já tem definido os valores do RSECE para a tipologia selecionada). Todos os parâmetros utilizados aqui, bem como os seus perfis foram os já referidos na tabela 3.5 e os igualmente usados na simulação com o *Cypeterm*.

3.3.1 Resultados

3.3.1.1 Verificação do RCCTE

Assim como na simulação realizada em primeiro lugar, começa-se por avaliar o *output* do *software* relativamente ao RCCTE. Resultados que estão presentes na seguinte tabela e no respetivo gráfico.

Tabela 3.10 - Resultados do RCCTE-STE, necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento

	Nic - Necessidades Nominais de Aquecimento (kWh/m ² .ano)	Ni – Valor limite das necessidades nominais de aquecimento (kWh/m ² .ano)	Nvc - Necessidades Nominais de Arrefecimento (kWh/m ² .ano)	Nv – Valor limite das necessidades nominais de arrefecimento (kWh/m ² .ano)
Edifício monozona	24,71	51,51	22,47	32

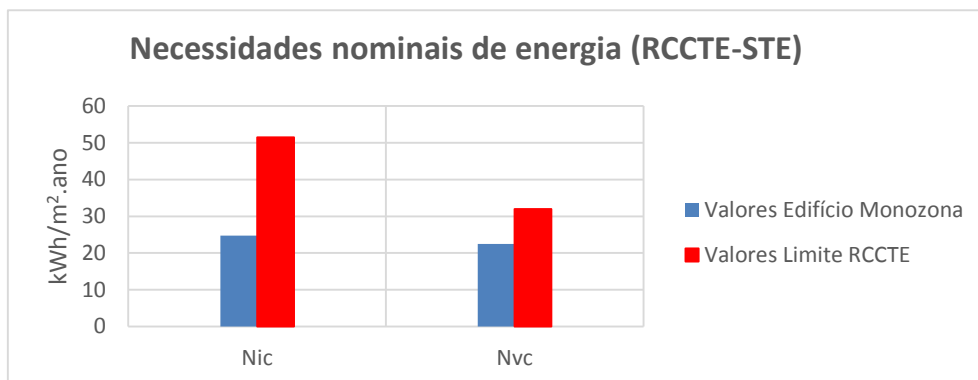


Figura 3.17 - Comparação entre as necessidades nominais de energia e os valores limite

Como se constata pelo gráfico anterior, o edifício encontra-se também em situação regulamentar segundo o RCCTE.

3.3.1.2 Necessidades energéticas ao longo do ano

Através da capacidade da ferramenta RCCTE-STE é possível também obter como resultado as necessidades energéticas do edifício em estudo, de aquecimento e arrefecimento (Figura 3.18). Outra particularidade deste programa, nesta fase da simulação, é a representação gráfica da variação da temperatura do ar interior e exterior ao longo do ano. Foram seleccionadas

duas semanas diferentes para essa representação, a quarta semana do ano e a trigésima quinta semana desse mesmo ano (Figura 3.19).

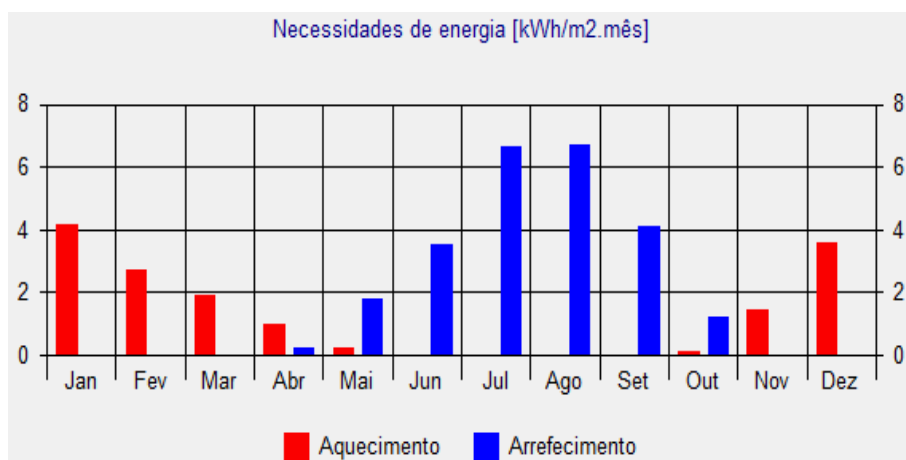


Figura 3.18 - Necessidades de aquecimento e arrefecimento

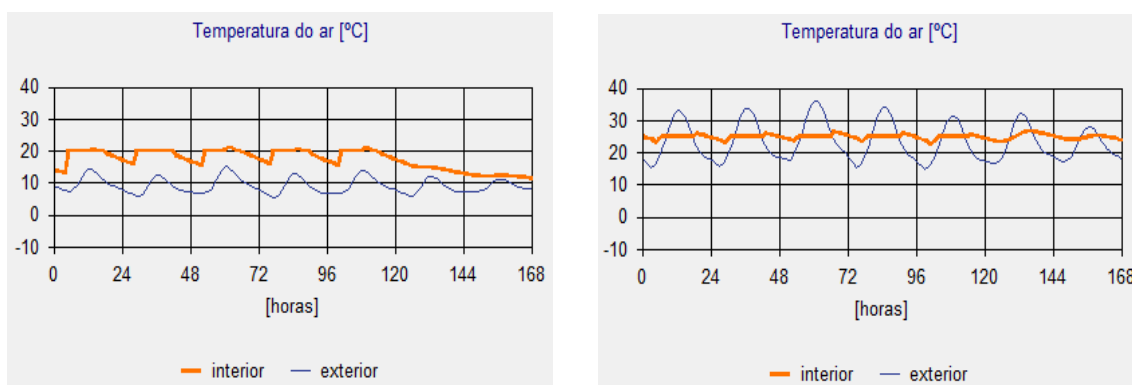


Figura 3.19 - Evolução da temperatura ao longo da 4ª semana e da 35ª semana do ano, respectivamente

3.3.1.3 Cargas térmicas

O último *output* do RCCTE-STE que falta expor são as potências nominais de aquecimento e arrefecimento. O programa apresenta também as potências máximas a instalar para as duas estações. Essas potências serão importantes para uma fase de projeto posterior onde a pessoa responsável pelo dimensionamento do sistema AVAC tenha que tomar decisões acerca dos equipamentos a escolher. Na tabela seguinte serão apresentados essas potências.

Tabela 3.11 – Potências fornecidas pelo RCCTE-STE

	Potencia máxima a instalar (kW)	Potência nominal de simulação (kW)
Aquecimento	31,78	22,70
Arrefecimento	45,93	32,81

3.4 Comparação de resultados

Durante as duas simulações realizadas, tentou-se manter a equivalência dos dados de entrada, sempre que as opções dos dois programas o permitiam. Nesse sentido, de forma a garantir que são utilizados os mesmos pressupostos em todas as simulações, teve-se um especial cuidado nas bases de dados climáticas utilizadas nos programas.

O RCCTE-STE utiliza a mesma base de dados climáticos do programa *Solterm*. Visto que o *Cypeterm/EnergyPlus* não lê esse tipo de ficheiros climáticos (.dat), efetuou-se uma conversão deste ficheiro para a extensão EPW (*EnergyPlus Weather Format*), visto ser este o tipo de ficheiro necessário. Esta conversão é feita através de um programa auxiliar designado por *Weather Converter* que vem incorporado no *EnergyPlus* [14]. Estes ficheiros de dados contêm, entre outros, a temperatura de bolbo seco e húmido, humidade relativa e pressão atmosférica para todos as horas do ano de referência (2006).

Portanto, para comparar os resultados obtidos, serão analisados apenas os fatores comuns que ambos os programas conseguem obter: verificação do RCCTE (ou seja, comparação de Nic e Nvc), cargas térmicas e necessidades energéticas ao longo do ano.

3.4.1 Verificação do RCCTE

O fatores considerados para esta parte do estudo foram as necessidades nominais de aquecimento (Nic) e as necessidades nominais de arrefecimento (Nvc). Neste sentido na figura seguinte comparam-se os valores obtidos pelos dois programas.

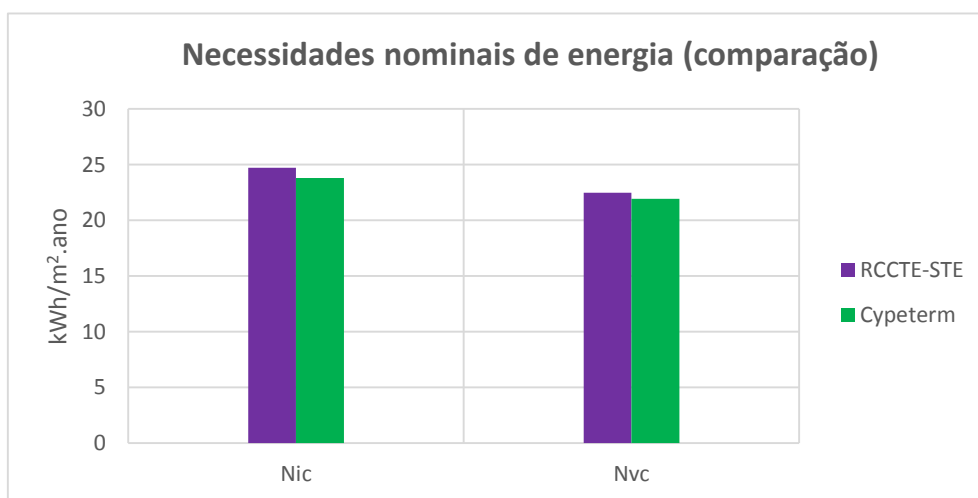


Figura 3.20 - Comparação das necessidades nominais de energia obtidas pelos dois programas

3.4.2 Cargas térmicas

O programa RCCTE-STE não permite a visualização das cargas térmicas hora a hora como o *Cypeterm* consegue. Então, apenas se podem comparar as potências nominais de simulação que são os valores fornecidos pelo programa de simulação simplificada. Nesse sentido o valor das potências nominais fornecido pelo *Cypeterm*, tem que ser deliberado por análise das figuras 3.13 e 3.14. Dessa análise retira-se que a situação de carga máxima para a estação de aquecimento (ou seja, a potência nominal de aquecimento) ocorre às 9 horas e tem um valor de 14,8 kW, enquanto para a estação de arrefecimento (ou seja, a potência nominal de arrefecimento) ocorre às 15 horas e assume um valor de 39,9 kW. Sendo assim já se conseguem os diferentes valores dos dois programas como se poderá ver na figura 3.21.

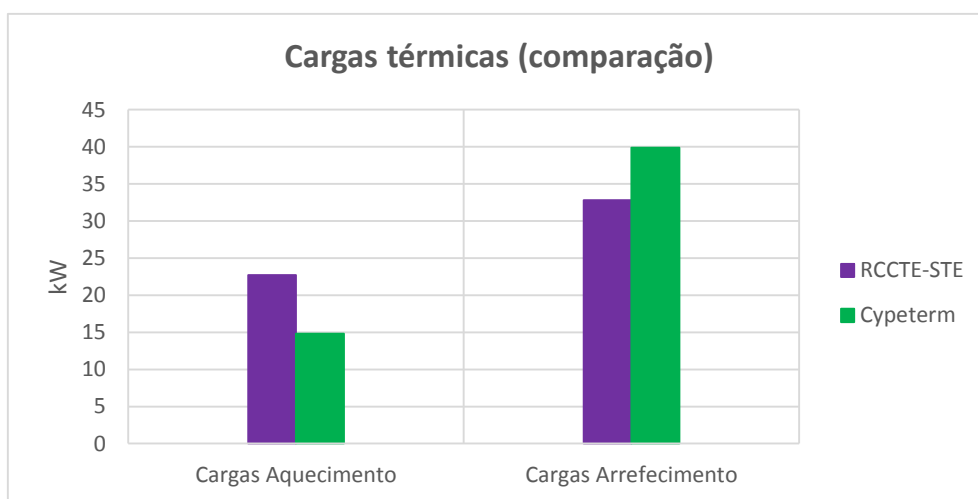


Figura 3.21 - Comparação das cargas de aquecimento e arrefecimento obtidas pelos dois programas

3.4.3 Necessidades energéticas ao longo do ano

Por fim, na figura 3.22 e figura 3.23 apresentam-se os valores comparativos das necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento, respetivamente, dos dois programas utilizados.

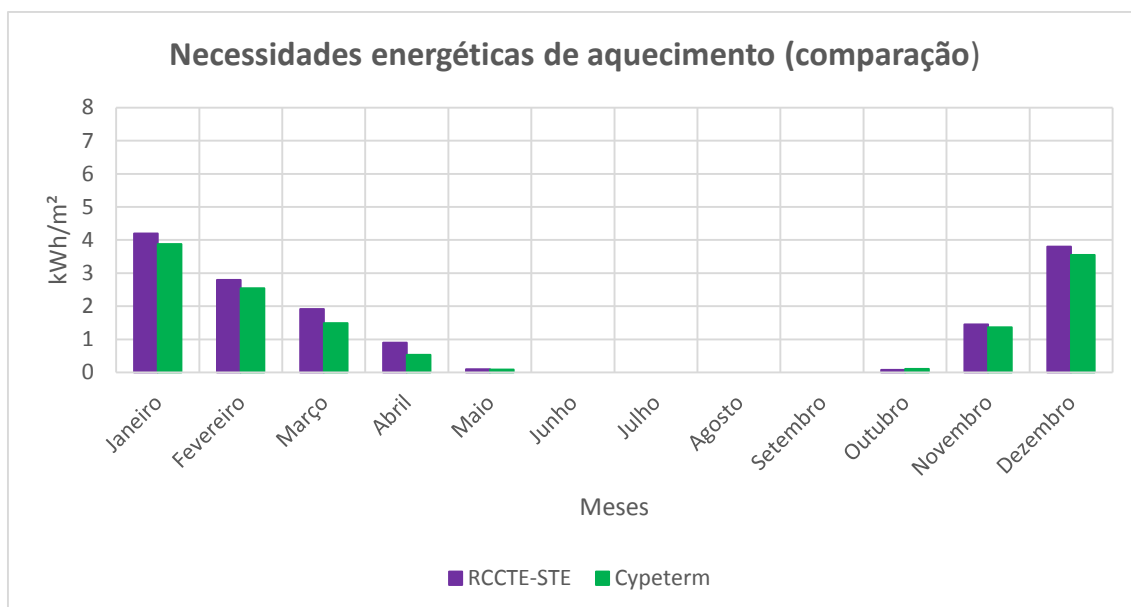


Figura 3.22 - Comparação das necessidades energéticas de aquecimento obtidas pelos dois programas

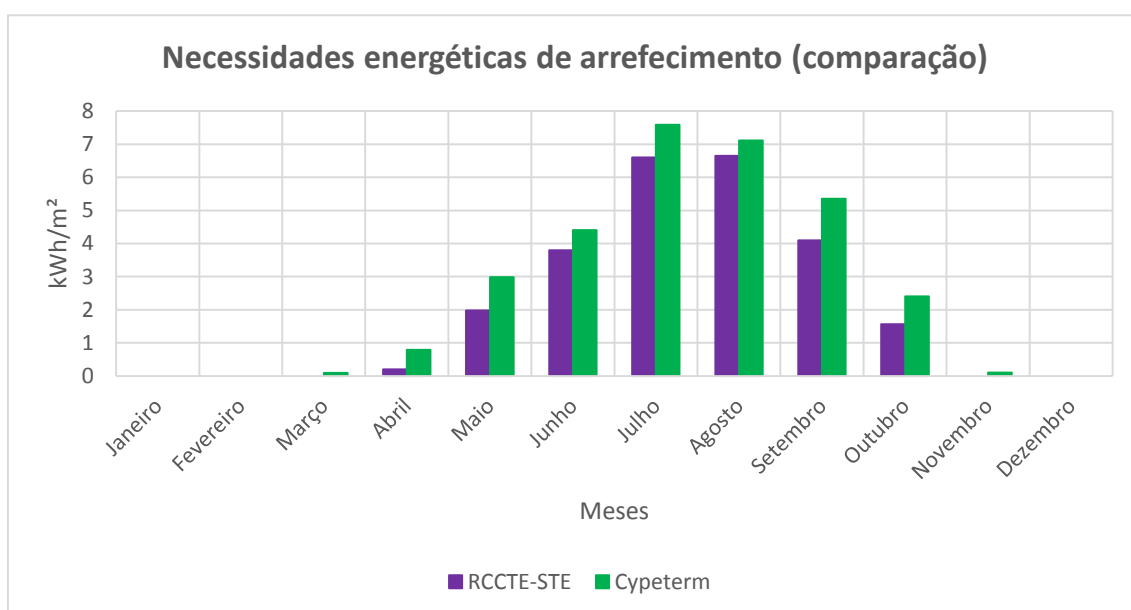


Figura 3.23 - Comparação das necessidades energéticas de arrefecimento obtidas pelos dois programas

3.5 Análise de resultados

Começando pela verificação do cumprimento das exigências do RCCTE, em ambos os programas o edifício em estudo encontra-se em situação regulamentar. Os parâmetros escolhidos para comparação, Nic e Nvc, apresentam valores bastante semelhantes nas duas simulações. Já seria de prever, pois todos os cálculos efetuados pelos dois programas para determinar estes fatores cingem-se aos preconizados pelo regulamento RCCTE, já demonstrados na revisão

bibliográfica deste documento. Essencialmente, o que pode variar aqui é a forma como os *inputs* são introduzidos nos programas, que apesar de terem sido colocados da forma mais semelhante possível nem sempre se consegue. Pode-se afirmar portanto, que tanto o *Cypeterm* como o *RCCTE-STE* conseguem verificar as exigências do regulamento em questão sem qualquer problema.

Observando a figura 3.19 constata-se que o sistema de aquecimento está ligado sempre que o edifício esteja ocupado, mantendo a temperatura de referência para o inverno (20°C). O que acontece é que sempre o edifício se encontra abaixo da tal temperatura de referência liga o sistema de climatização. Ainda na mesma figura, mas no gráfico referente à 35ª semana, pode-se constatar que sempre, estando o edifício ocupado, que a temperatura exterior ultrapassa os 25°C (temperatura de referência para a estação de arrefecimento) o sistema de arrefecimento é ligado para que não seja ultrapassada essa mesma temperatura.

Relativamente à comparação das potências nominais de simulação (cargas térmicas) os valores apresentados pelo *Cypeterm* diferem dos resultados apresentados pelo *RCCTE-STE*. Nas muitas simulações realizadas em cada um dos programas notou-se uma coerência nos resultados que diziam respeito a ganhos internos com iluminação, equipamentos, ganhos pela envolvente exterior, envidraçados e outros. No entanto, os valores mais diferenciados, que provavelmente levaram às diferenças apresentadas, prenderam-se com a ventilação.

Ainda relacionado com a ventilação falta mencionar um aspeto relevante, que são as infiltrações de ar. Um edifício mesmo que possua ventilação mecânica, a ventilação natural continua a estar presente, em maior ou menor grau, dependendo do desequilíbrio entre os caudais insuflados e extraídos mecanicamente. No caso do edifício em estudo, o *RCCTE-STE* determina e considera as infiltrações de ar nos períodos sem ocupação, como se pode comprovar pela figura 3.24. Contudo o *Cypeterm* não faz esse cálculo, considerando o seu valor nulo.

Figura 3.24 - Quadro de ventilação apresentado pelo RCCTE-STE

Há ainda que mencionar que o programa *Cypeterm* considera as sombras próprias do edifício, enquanto o RCCTE-STE não o faz. Neste caso de estudo, o programa considera doze sombras diferentes com uma área total de 35,48 m². Esta pequena diferença poderá, também, aumentar a disparidade de resultados encontrada.

O último fator comparado foram as necessidades energéticas ao longo do ano. Como seria de esperar, tendo em conta a discrepância de valores encontrada nas potências, os valores diferem como se pode observar nas figuras 3.22 e 3.23.

Como descrito no segundo capítulo deste trabalho, os métodos de cálculo do RCCTE-STE e do *Cypeterm* são algo diferentes. Atribui-se portanto, como mais uma das prováveis causas, se não a maior, a originar a discrepância de valores encontrada nos resultados, a diferente metodologia de cálculo utilizada em cada programa.

Para terminar falta fazer uma referência em relação aos programas em si. Considera-se o RCCTE-STE um programa relativamente prático, apesar de por vezes a interface não ser fácil para o utilizador, como por exemplo na introdução de dados que exige uma criação de códigos para cada elemento. Essa mesma introdução de dados torna-se, muitas vezes, mais demorada do que no *Cypeterm* pois este com a biblioteca de dados do LNEC – ITE 50 [12] incorporada, torna-se bastante rápido na parametrização do edifício. Este último executa também, automaticamente, os cálculos dos coeficiente globais de transmissão térmica bem como das massas superficiais dos vários elementos de construção, destacando-se mais uma vez do RCCTE-STE no que toca ao tempo gasto a introduzir dados. Nesse sentido, provavelmente o *Cypeterm* não será considerado a escolha mais indicada em termos didáticos.

O *Cypeterm* demonstrou igualmente ser uma boa interface para o *EnergyPlus*, apresentando ferramentas importantes, como a capacidade de determinar as pontes térmicas lineares automaticamente ou a possibilidade de visualizar as cargas térmicas hora a hora, que será de extrema importância mais à frente neste trabalho. Este programa permite também, como já referido, obter uma visualização a três dimensões do edifício em estudo que possibilita ao projetista ter uma noção mais próxima da realidade do que está a fazer.

Para finalizar, um aspeto que se pode considerar negativo em relação ao *Cypeterm*, é que torna-se indispensável que o utilizador possua conhecimentos de *Autodesk AutoCAD*.

4. Alterações ao Caso de Estudo Monozona

Nos dias que correm uma das maiores preocupações é a sustentabilidade energética. Nesse sentido, um dos fatores chave para a conseguir passa por melhorar o desempenho energético dos edifícios. Portanto, neste capítulo serão efetuadas alterações estruturais no edifício definido no capítulo anterior, na tentativa de entender como é que cada parâmetro construtivo é determinante na caracterização energética de um edifício. Todas as modificações estudadas neste capítulo serão realizadas com auxílio do *Cypeterm* devido à maior facilidade e rapidez em alterar este tipo de parâmetros neste programa.

4.1 Pé direito

Facilmente se consegue alterar o pé direito de um edifício sem efetuar qualquer alteração a nível estrutural, bastando por exemplo colocar um teto falso ou baixar/subir o já existente. Esta alteração não fará com que existam variações nas características térmicas do edifício pois o coeficiente global de transmissão térmica, U , irá permanecer igual seja qual for o pé direito. No entanto as suas características dimensionais não se vão manter iguais, pois as áreas das paredes sofreram alterações consoante o aumento/redução do pé direito.

Outro parâmetro que será com toda a certeza afetado por esta alteração é o volume interior do edifício, que se determina da seguinte forma:

$$\text{Volume interior} = \text{Área útil} \times \text{Pé direito} \quad 31)$$

Estudando pormenorizadamente as fichas de resultados obtidas pelo programa, verifica-se que uma percentagem considerável das perdas térmicas quando se determinam as Necessidades Nominais de Aquecimento é devido à renovação de ar, como se pode comprovar pelo gráfico seguinte:

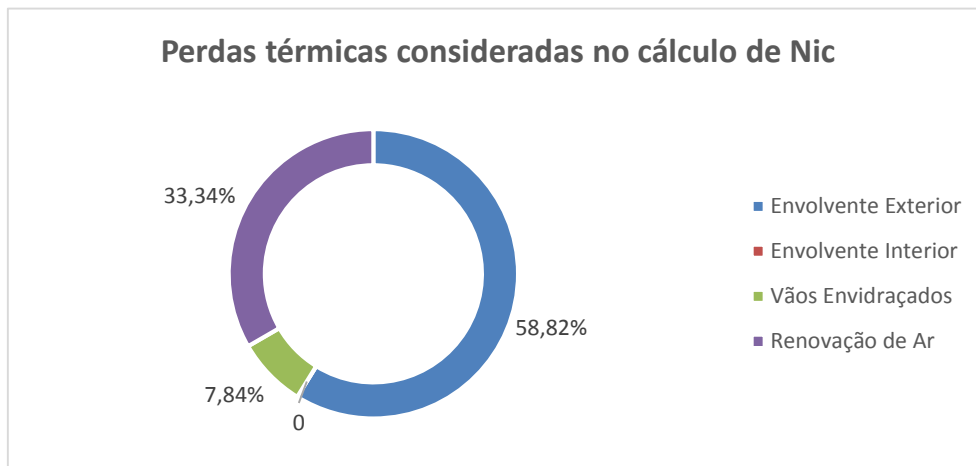


Figura 4.1- Perdas térmicas consideradas no cálculo de Nic

A renovação do ar está diretamente associada ao pé direito do espaço, segundo o RCCTE:

$$\text{Perdas associadas à renovação de ar} = \text{Volume} \times \text{Taxa de renovação nominal} \times 0,34 \quad 32)$$

Uma vez que o volume é dado pela equação 31 é de esperar que as perdas associadas à renovação de ar aumentem/diminuam de forma linearmente direta com o aumento/diminuição do pé direito. Também as perdas pela envolvente exterior irão aumentar/diminuir da mesma forma que as perdas por renovação de ar. Isto sucede devido à equação seguinte que é utilizada no cálculo da transmissão de calor:

$$Q = A \times U \times \Delta T \quad 33)$$

No que diz respeito às Necessidades Nominais de Arrefecimento, também se espera que estas sofram alterações devido à modificação do pé direito. Porém, não é expectável que estas alterações sejam tão significativas como nas Necessidades Nominais de Aquecimento pois no cálculo das Nvc não são contabilizadas nem as trocas de calor associadas à renovação de ar nem as trocas de calor através das pontes térmicas.

Então para se verificar todas estas afirmações foi se alterando o pé direito do edifício, com pé direito inicial de 3 m, de meio em meio metro, como se pode observar na tabela 4.1.

Tabela 4.1- Resultados obtidos com o aumento do pé direito do edifício monozona

Pé direito (m)	Necessidades Nominais		Potencias Nominais		Inércia térmica
	Aquecimento (kWh/m².ano)	Arrefecimento (kWh/m².ano)	Aquecimento (kW)	Arrefecimento (kW)	
2,5	20,48	22,38	14,1	39,8	254,75
3	23,79	21,94	14,8	39,9	265,95
3,5	27,10	21,49	14,9	40	277,15
4	30,75	21,03	15,1	40,1	288,35
4,5	34,4	20,56	15,3	40,1	299,55
5	38,04	20,09	15,3	40,1	310,75

No gráfico seguinte pode ser vista a evolução das Necessidades de Aquecimento (Nic) e Arrefecimento (Nvc) à medida que se faz variar o pé direito do edifício.

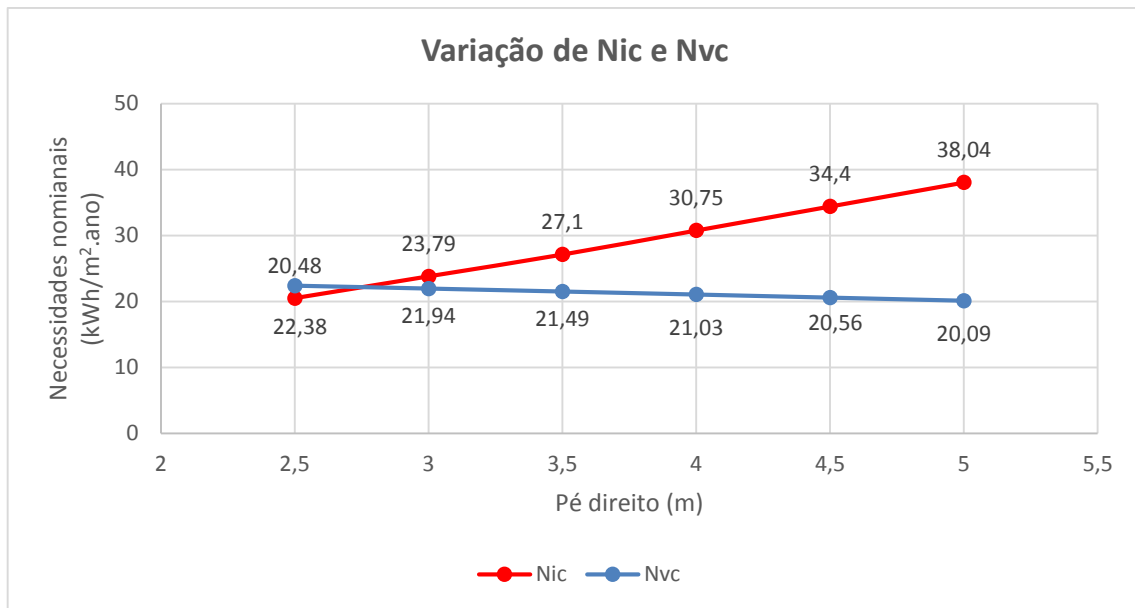


Figura 4.2 - Evolução das necessidades de aquecimento e arrefecimento com o aumento do pé direito

Como seria de esperar observando o gráfico conclui-se que quanto maior o pé direito maior serão as necessidades de aquecimento (Nic) e por outro lado serão menores as necessidades de arrefecimento (Nvc). Falta então analisar as necessidades energéticas totais (Aquecimento + Arrefecimento), para se realmente perceber se o aumento/diminuição é benéfico ou não em termos energéticos. No gráfico seguinte está presente essa evolução.

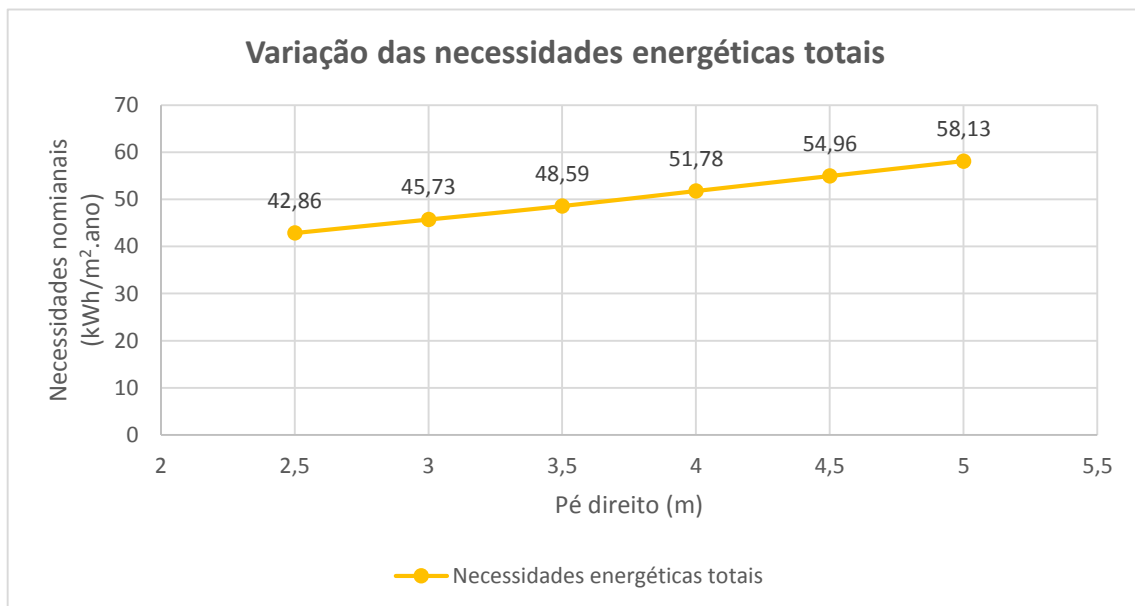


Figura 4.3 - Evolução das necessidades energéticas totais com o aumento do pé direito

Tal como previsto verifica-se um aumento das necessidades energéticas totais do edifício à medida que se aumenta o pé direito do mesmo. Em termos percentuais esse aumento foi de cerca de 26%. Finalmente, no gráfico seguinte podem ser vistas as variações das potências de aquecimento e arrefecimento.

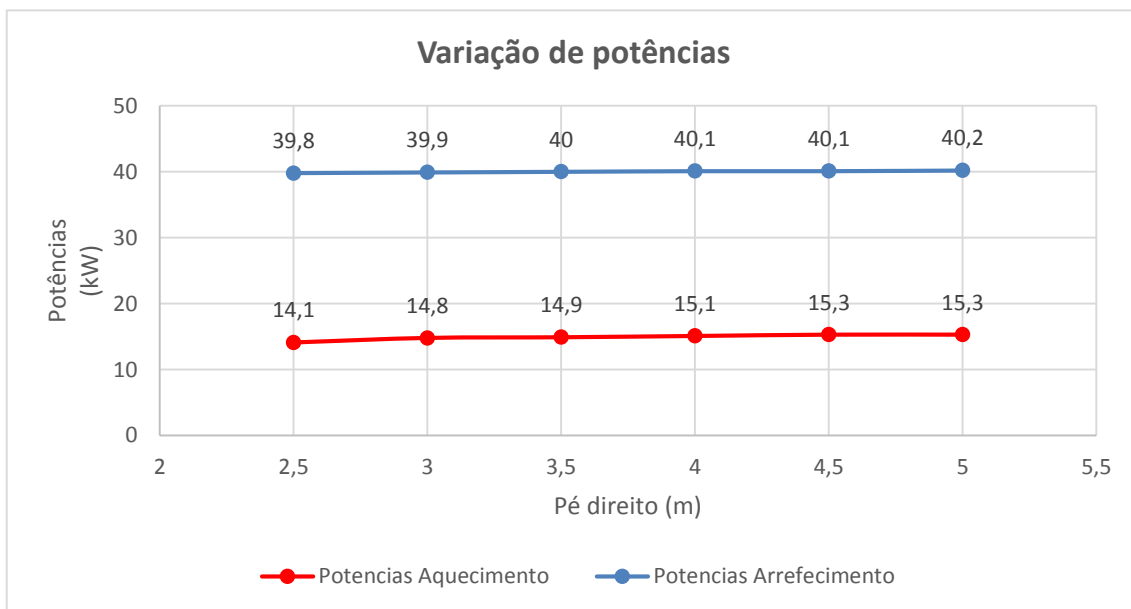


Figura 4.4 - Evolução das potências de aquecimento e arrefecimento com o aumento do pé direito

Em relação às potências a influência do pé direito não é tão “visível”. Contudo consegue-se depreender pelo gráfico que há um aumento ligeiro de ambas potências quando se aumenta o pé direito. Este ligeiro aumento está diretamente relacionada com o facto de ser necessário um caudal de ar insuflado superior quando o pé direito do edifício é aumentado.

Pela tabela 4.1 constata-se que sempre que o pé direito aumenta também a inércia térmica do espaço aumenta. No entanto a classe de inércia mantém-se inalterada (classe média). A inércia térmica será um dos elementos a modificar de seguida, portanto nessa fase será feita uma análise mais exaustiva sobre este assunto.

Em suma, com estes resultados conclui-se que sempre que for possível é preferível optar por um pé direito mais baixo. Todas as perdas térmicas associadas ao aumento do volume interior bem como o aumento das áreas de paredes vão inflacionar a fatura energética do edifício no final do ano.

4.2 Inércia Térmica

Como já referido na secção 3.1.5 deste trabalho, a inércia térmica de um corpo é a resistência que este possui em manter a temperatura em que se encontra, atrasando os efeitos das variações de temperatura que ocorrem no meio em que está inserido. No caso específico dos edifícios existem três classes de inércia, que são determinadas através da massa superficial útil por unidade de área útil de pavimento, I_t . Massa superficial essa que se determina, como já visto, pela equação 30.

Para se estudar o efeito da inércia térmica, foi se alterar a classe de inércia do edifício em estudo (classe média) para forte e fraca. Interpretando a definição de inércia térmica bem como a equação 30, depreende-se que a inércia do edifício está diretamente ligada ao tipo de construção utilizado. No entanto, este é um parâmetro facilmente alterável sem modificar o coeficiente global da transmissão (U) do respetivo elemento a alterar. Para tal, basta mudar a localização dos elementos isolantes. Por exemplo, para aumentar a inércia de um edifício basta trocar a localização do XPS (elemento isolante utilizado) “mais para o exterior”. Na figura seguinte pode-se ver essa mesma alteração.

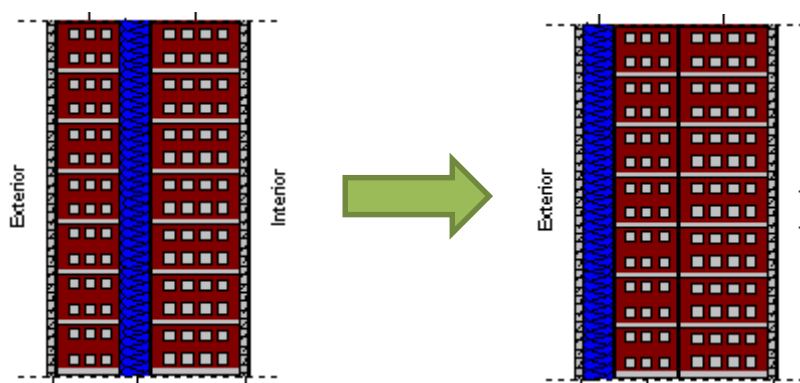


Figura 4.5 - Alteração da localização do elemento isolante

Com esta pequena alteração a massa superficial útil por metro quadrado de área de pavimento (I_t) aumentou de 265,95 para 272,88. Então, com alterações deste género nos outros elementos da construção (PTP's, cobertura e pavimento) atingiu-se uma inércia de classe fraca. O RCCTE (anexo VII) preconiza que a massa superficial útil dos elementos (M_{si}) tem que ser menor ou igual que 150 kg/m^2 . Por essa razão não se consegue apenas alterando a localização do elemento isolante chegar a uma classe de inércia forte. Para se alcançar essa classe introduziram-se então paredes interiores de betão aumentando assim a classe de inércia como pretendido.

Desta forma foram obtidos os seguintes resultados.

Tabela 4.2 - Resultados obtidos com o aumento da inércia térmica

Classe de Inércia	Necessidades Nominais		Potências Nominais	
	Aquecimento (kWh/m ² .ano)	Arrefecimento (kWh/m ² .ano)	Aquecimento (kW)	Arrefecimento (kW)
Fraca ($I_t=107,95$)	24,69	22,24	14,9	41,5
Média ($I_t=265,95$)	23,79	21,94	14,8	39,9
Forte ($I_t=412,83$)	18,86	21,66	14,1	38,1

Como se pode verificar pela tabela anterior, quando o edifício estudado tem uma inércia térmica de classe forte (é considerada forte quando $I_t > 400$) as necessidades energéticas são mais baixas bem como as potências de aquecimento e arrefecimento. Já na inércia térmica fraca acontece precisamente o oposto. Em termos globais, de uma inércia fraca para uma inércia forte, as necessidades de aquecimento diminuem cerca de 23% enquanto as de arrefecimento cerca de 3% o que levará a uma poupança na fatura energética.

A inércia térmica, devido ao fluxo de calor demorar mais tempo (para além de demorar mais tempo esse fluxo de calor também será menor) a percorrer um elemento de maior inércia térmica, pode ocorrer que, entretanto o ambiente exterior fique a uma temperatura inferior à registada no interior. Logo, este fenómeno provoca um desfasamento e amortecimento da onda de calor através dos elementos construtivos. Assim, um projetista de climatização tem que ter em especial atenção à inércia térmica quando for a escolher o equipamento adequado às necessidades do edifício a ser projetado. Uma explicação pormenorizada sobre este tema pode ser encontrada no capítulo 3.2.5 do livro *Térmica de Edifícios* [17].

Sendo o programa *Cypeterm* capaz de fornecer as cargas térmicas hora a hora de um determinado dia, vamos então verificar se o mesmo é sensível ao fenómeno de desfasamento falado no parágrafo anterior. Para tal, foram obtidos três diferentes gráficos para as respetivas classes de inércia. Esses gráficos contêm a curva da temperatura exterior ao longo do dia escolhido (selecionou-se o dia 29 de Agosto) e as cargas térmicas de arrefecimento hora a hora. A curva da temperatura exterior ao longo do dia conseguiu-se com o auxílio de um programa chamado *xEsoView* (versão 0.32), que aproveita um ficheiro *ESO* (*EnergyPlus output file*) criado

aquando da realização da simulação dinâmica, para dar resultados como a variação da temperatura exterior, variação dos ganhos internos, variação dos ganhos devido à iluminação, entre outros.

Desta forma foram obtidos os seguintes gráficos.

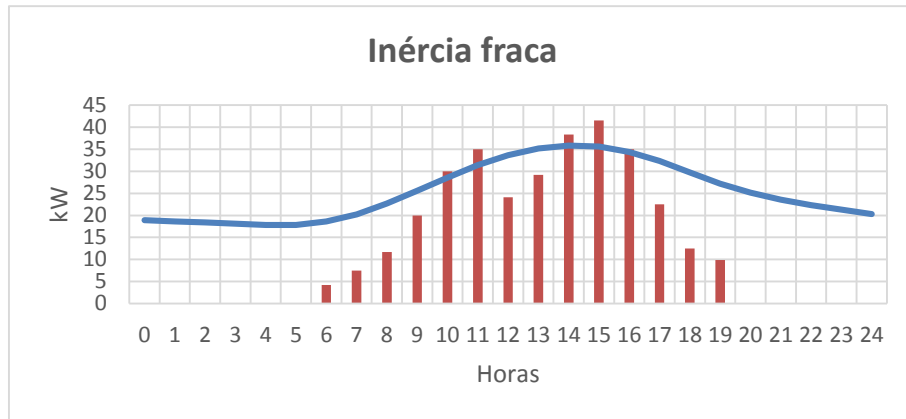


Figura 4.6 - Evolução da temperatura exterior e das cargas térmicas de arrefecimento ao longo do dia 29 de Agosto com uma inércia de classe fraca ($I_t = 107,95$)

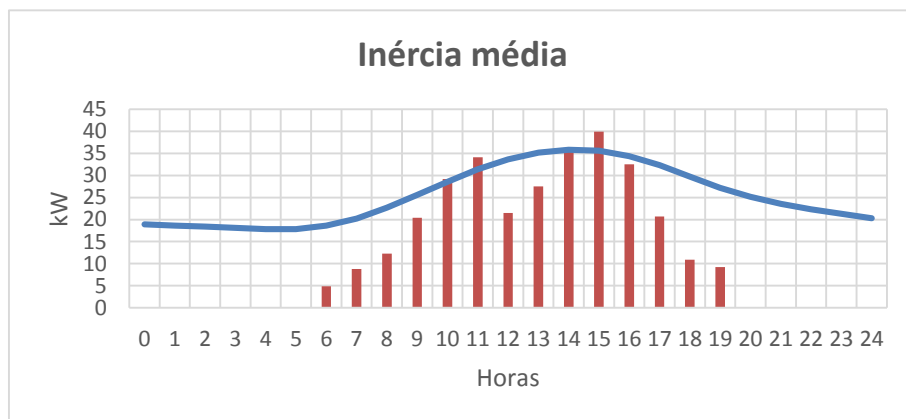


Figura 4.7 - Evolução da temperatura exterior e das cargas térmicas de arrefecimento ao longo do dia 29 de Agosto com uma inércia de classe média ($I_t = 265,95$)

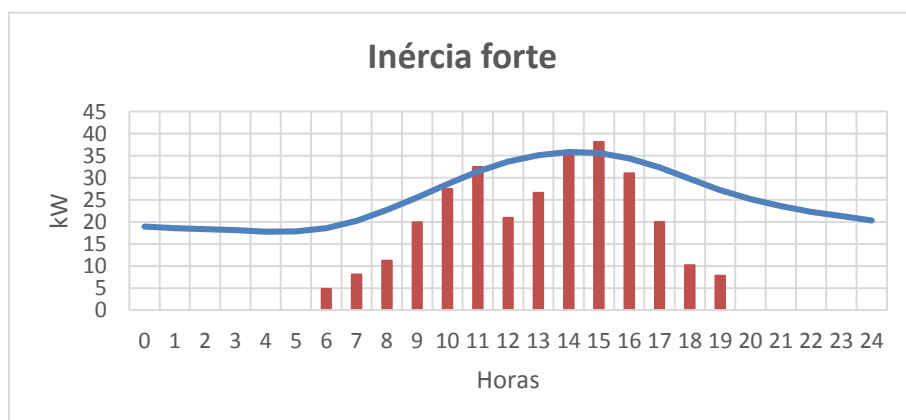


Figura 4.8 - Evolução da temperatura exterior e das cargas térmicas de arrefecimento ao longo do dia 29 de Agosto com uma inércia de classe forte ($I_t = 412,83$)

Analisando os gráficos conclui-se que existe um desfasamento de tempo entre a hora onde a temperatura exterior é máxima (14h) e a hora onde a carga é máxima (15h). No entanto, era expectável que se conseguisse observar nos gráficos diferenças, entre por exemplo a inércia fraca e a inércia forte, ao nível do desfasamento referido. Ou seja, esperava-se que no gráfico da inércia fraca não existisse praticamente nenhum “*delay*” entre a hora onde a temperatura exterior é máxima e a hora da carga máxima, enquanto na figura 4.8 era espectável que existisse uma maior diferença entre essas duas horas. Pode-se concluir então, que possivelmente o *Cypeterm* não é sensível à inércia térmica quando determina as cargas térmicas diárias.

Apesar de o RCCTE-STE não possibilitar o estudo das cargas térmicas hora a hora, permite a visualização da evolução da temperatura exterior assim como da temperatura dentro do edifício ao longo de uma semana. Assim, foi realizado o mesmo estudo que anteriormente mas desta vez no programa mencionado, de modo a perceber se este é ou não sensível à variação da inércia térmica. Nas figuras seguintes apresentam-se os resultados obtidos.

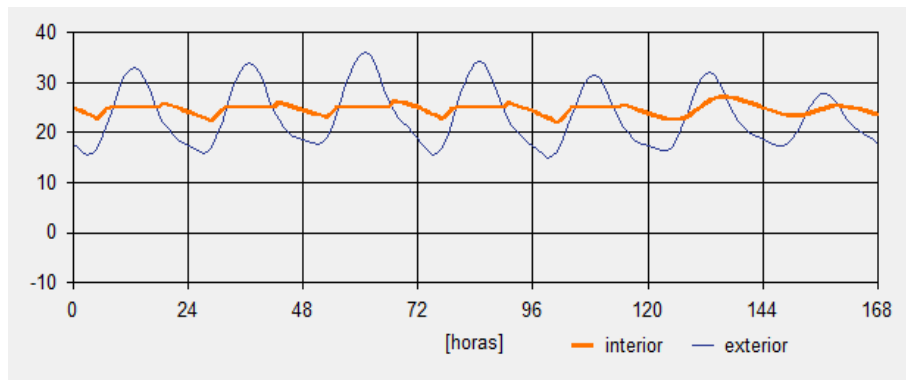


Figura 4.9 - Evolução da temperatura exterior e interior do edifício com uma inércia de classe fraca

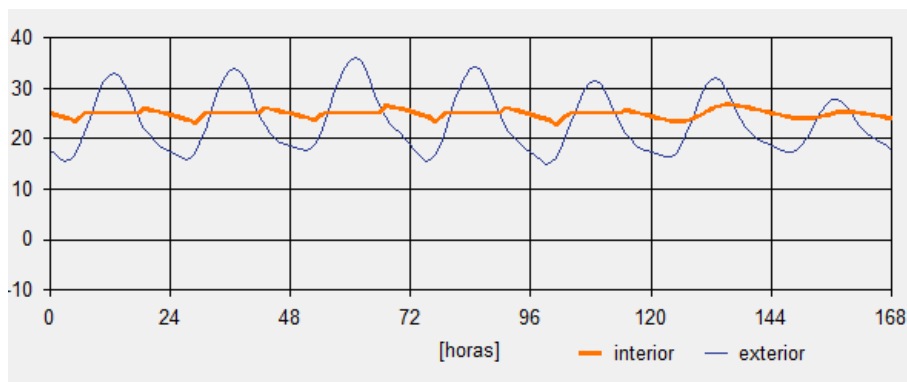


Figura 4.10 - Evolução da temperatura exterior e interior do edifício com uma inércia de classe média

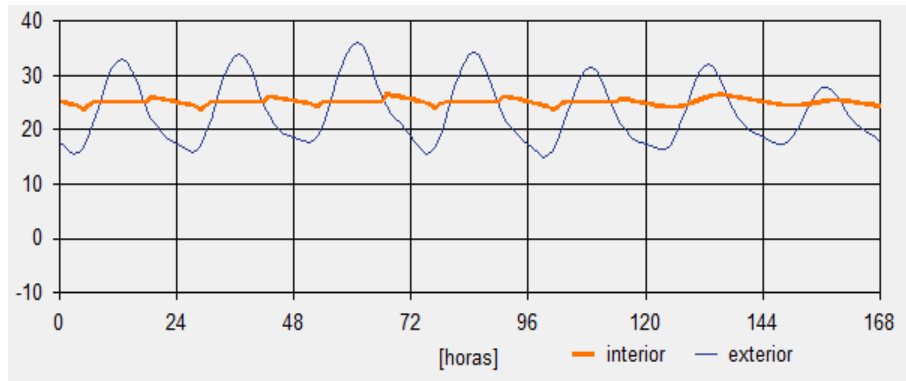


Figura 4.11 - Evolução da temperatura exterior e interior do edifício com uma inércia de classe forte

Analisando as figuras anteriores ao pormenor, observar-se que a amplitude da linha da temperatura interior (linha laranja) diminui consoante o aumento da inércia térmica. No entanto, o “*delay*” já referido atrás, que era o que se pretendia analisar, é inexistente tal como no *Cypeterm*. Note-se ainda, que o desfasamento de tempo entre a hora onde a temperatura exterior é máxima e a hora onde a carga é máxima é de cerca de 2,5 horas neste programa (no *Cypeterm* essa diferença é aproximadamente de 1 hora). Um bom exemplo dos resultados que se esperavam encontrar pode ser analisado na figura 2.15 do livro *Climatização em Edifícios - Envolvente e Comportamento Térmico* [15].

Deste estudo da inercia térmica do edifício pode concluir-se que este é um parâmetro que tem bastante influência do ponto de vista energético e económico. Pode-se afirmar que uma inércia térmica de classe forte ($I_t > 400 \text{ kg/m}^2$) traduz-se numa poupança na fatura energética, pois tanto as necessidades energéticas como as potências de climatização se revelam mais baixas em comparação com uma inércia fraca ($I_t < 150 \text{ kg/m}^2$). No entanto há que referir que para obter uma inércia de classe forte é necessário uma maior despesa a nível económico, o que obriga sempre a fazer um estudo nesse aspeto para verificar se compensa ou não a inércia de classe superior. Para terminar salienta-se também que o estudo deste parâmetro é determinante para um projetista de climatização aquando da escolha do equipamento, para que o espaço seja climatizado da melhor forma possível.

4.3 Vãos Envidraçados

As novas tendências construtivas apontam para o hábito de utilização de vãos envidraçados cada vez maiores. Sendo os vãos envidraçados elementos bastante favoráveis a trocas de calor torna-se imprescindível conhecer de que forma podem afetar o desempenho térmico dos edifícios. A tendência crescente da utilização do vidro na construção torna ainda mais

importante uma análise detalhada a sua utilização.

Em Portugal a incidência de radiação solar é das mais fortes da Europa e portanto é de esperar que na estação de arrefecimento os ganhos solares através dos envidraçados aumentem consideravelmente as necessidades energéticas. Assim, é importante perceber se um aumento/diminuição da área dos envidraçados compensa em termos energéticos e igualmente significativo, depreender qual a orientação dos mesmos que mais se traduz numa redução da fatura energética do edifício. Então, neste subcapítulo, será feito um aumento gradual da área de envidraçados segundo cada orientação e desta maneira observar qual a influência dessas mesmas alterações.

4.3.1 Alteração 1 – aumento da área de envidraçados Este e Oeste

A primeira modificação ao nível dos envidraçados passa por aumentar a área dos mesmos a Este e a Oeste. Nesta parte do trabalho optaram-se por estudar os efeitos das alterações apenas nas necessidades energéticas nominais de aquecimento e arrefecimento (N_{ic} e N_{vc}) e na inércia térmica. As potências de climatização não foram estudadas aqui, pois estas acompanham a evolução das necessidades energéticas. Na figura 4.12 pode ser observada a evolução das necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento bem como o seu total. No eixo horizontal dos gráficos vão constar as áreas dos envidraçados verticais em estudo.

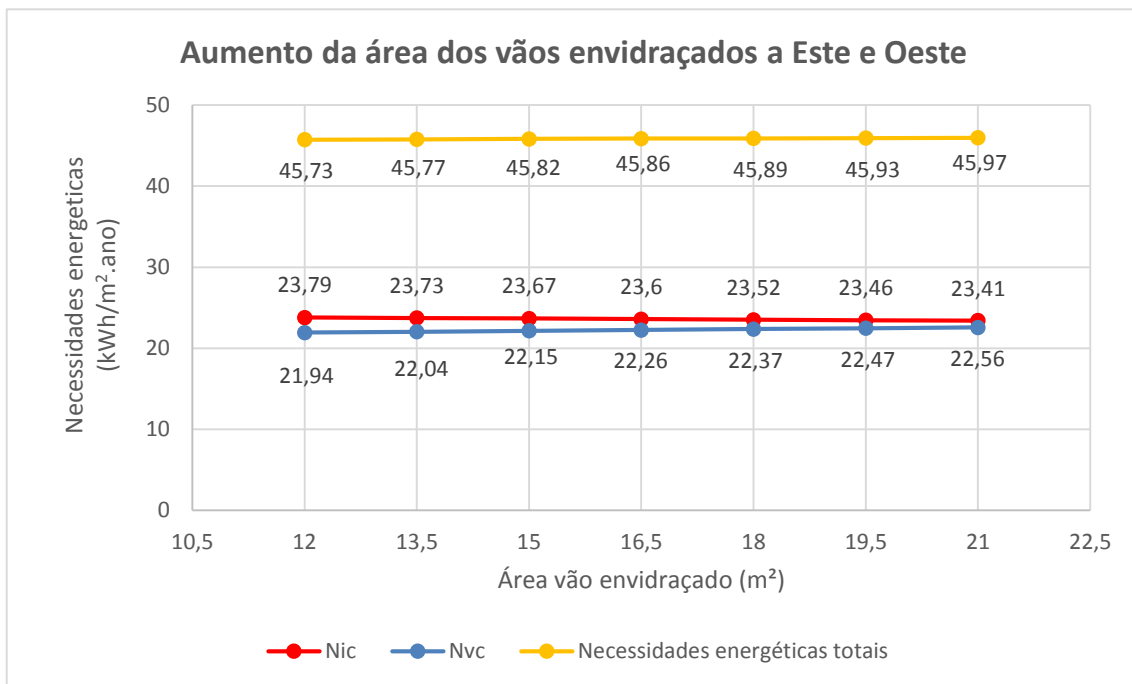


Figura 4.12 - Evolução de N_{ic} , N_{vc} e necessidades energéticas totais com o aumento da área dos vãos envidraçados a Este e Oeste

Do gráfico anterior conclui-se que existe um ligeiro aumento das necessidades energéticas totais quando se aumentam os envidraçados a Este e Oeste do edifício. No entanto, o aumento que se registou é praticamente insignificativo. Contudo, o facto de existirem maiores áreas para a entrada de iluminação natural poderá traduzir-se numa poupança na iluminação artificial bem como numa melhoria (subjativa) estética do próprio edifício.

4.3.2 Alteração 2 – aumento da área de envidraçados a Norte

A segunda alteração ocorre nos envidraçados localizados na parede Norte do edifício. O processo para estudar esta modificação foi o mesmo utilizado atrás. No gráfico seguinte será apresentada a evolução das necessidades energéticas das duas estações bem como das necessidades energéticas totais.

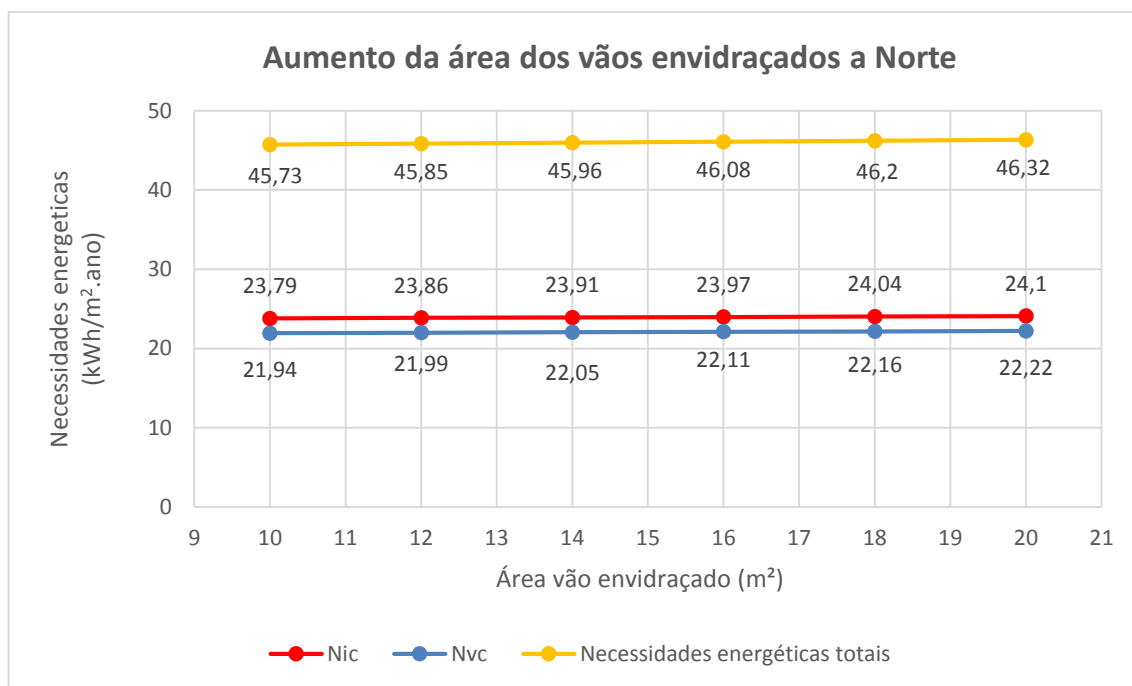


Figura 4.13 - Evolução de Nic, Nvc e necessidades energéticas totais com o aumento da área dos vãos envidraçados a Norte

Observando o gráfico conclui-se que existe um aumento tanto das necessidades de aquecimento como de arrefecimento. Naturalmente, que na linha das necessidades energéticas totais se regista que não é nada benéfico, em termos energéticos, para o edifício a colocação de vãos envidraçados segundo a orientação Norte. Analisando os valores de radiação solar para a orientação Norte, considerada pelo programa (ver anexo G), que são bastante inferiores aos das restantes orientações, é de fácil compreensão que a radiação solar não irá compensar, no caso da estação de aquecimento, todas as perdas de calor que ocorrem pela área de envidraçado.

4.3.3 Alteração 3 – aumento da área de envidraçados a Sul

Agora será feito o mesmo que na alteração 2 mas com os envidraçados situados na parede Sul do edifício. Visto que os valores de radiação solar para esta orientação são bastante superiores aos das restantes é fácil prever que irá acontecer o contrário do que ocorreu quando se aumentou a área dos envidraçados voltados a Norte, ou seja, as necessidades energéticas totais vão diminuir. Posto isto, na figura 4.14 pode-se observar a evolução dessas necessidades energéticas totais assim como os resultados para as estações de aquecimento e arrefecimento.

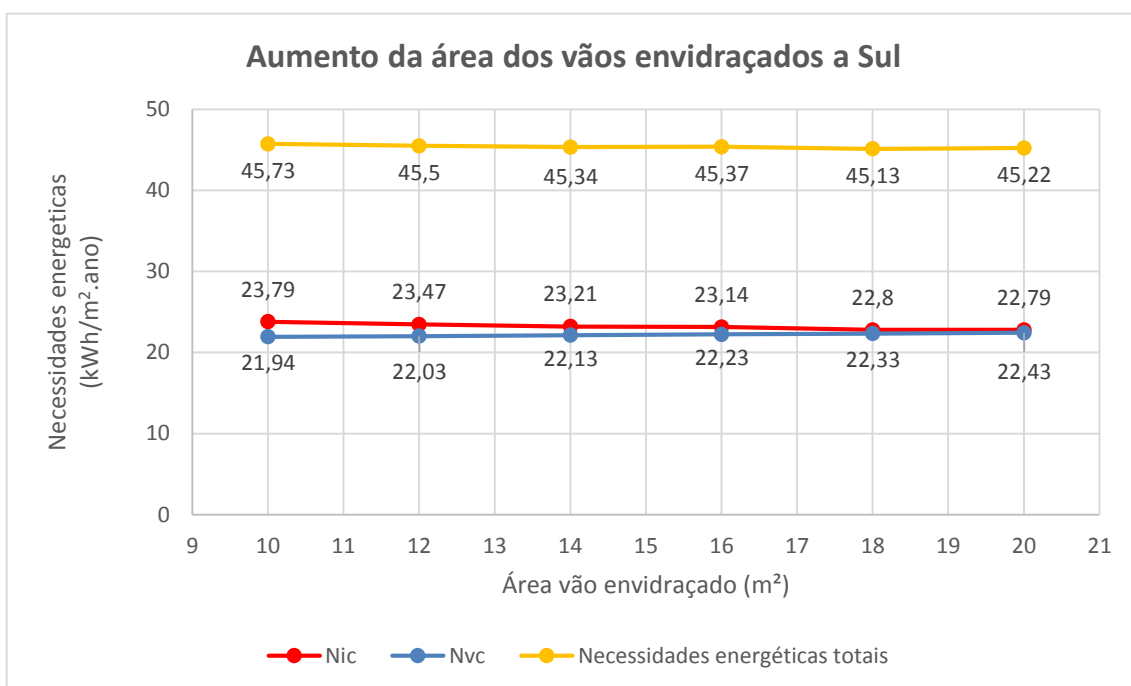


Figura 4.14 - Evolução de Nic, Nvc e necessidades energéticas totais com o aumento da área dos vãos envidraçados a Sul

Como esperado, após análise da figura 4.14, confere-se o que foi dito anteriormente. Ou seja, enquanto as necessidades de arrefecimento aumentam, as de aquecimento diminuem. Para se verificar, se o que se “poupa” durante a estação de aquecimento compensa face ao aumento na estação de arrefecimento basta analisar as necessidades energéticas totais (linha amarela da figura anterior). Observando essa linha constata-se que o aumento das trocas de calor que ocorrem no Verão é suplantado pela diminuição já referida, graças aos ganhos solares obtidos pelo aumento da área envidraçada. A redução energética verificada, em termos percentuais, é de cerca de 1,2%. Contudo o aumento gradual da área do envidraçado foi feito de dois em dois metros quadrados, se fossem realizados aumentos de maior área com certeza que a redução energética verificada seria maior.

4.3.4 Alteração 4 – Colocação de vãos envidraçados horizontais

Nos dias que correm, é cada vez mais usual verem-se vãos envidraçados horizontais, também designados como claraboias. Seja num edifício de serviços ou residencial, o objetivo principal deste elemento construtivo passa por fornecer mais luz natural ao edifício bem como calor para o seu interior sem ser necessário recorrer a eletricidade. Assim sendo as claraboias permitem poupar na eletricidade como ainda trazem vantagens estéticas. Contudo, como já comprovado nos vãos envidraçados verticais, a entrada de luz num espaço significa também maiores trocas de calor com o exterior.



Figura 4.15 – Exemplo ilustrativo de um vão envidraçado horizontal

Vão-se então introduzir no edifício em estudo vários vãos envidraçados horizontais de 4 m² cada. Estes serão colocadas progressivamente para se poder observar a evolução das necessidades energéticas à medida que se aumenta o seu número. O vidro utilizado para a claraboia tem um fator solar de 0,43 e um coeficiente de transmissão de 2,70 W/m²·°C. Posto isto na figura 4.16 demonstra-se a evolução das necessidades de aquecimento e arrefecimento bem como o seu total.

A colocação da claraboia irá aumentar as necessidades de arrefecimento e diminuir as necessidades de aquecimento como se constata na figura 4.16. No entanto para se verificar, mais uma vez, se compensa este tipo de alteração tem que se analisar o balanço entre as necessidades energéticas referidas. Facilmente se conclui que a introdução de um vão envidraçado horizontal não é nada vantajoso em termos energéticos. A diminuição dos gastos na estação de inverno nunca supera o aumento de gastos na estação de verão.

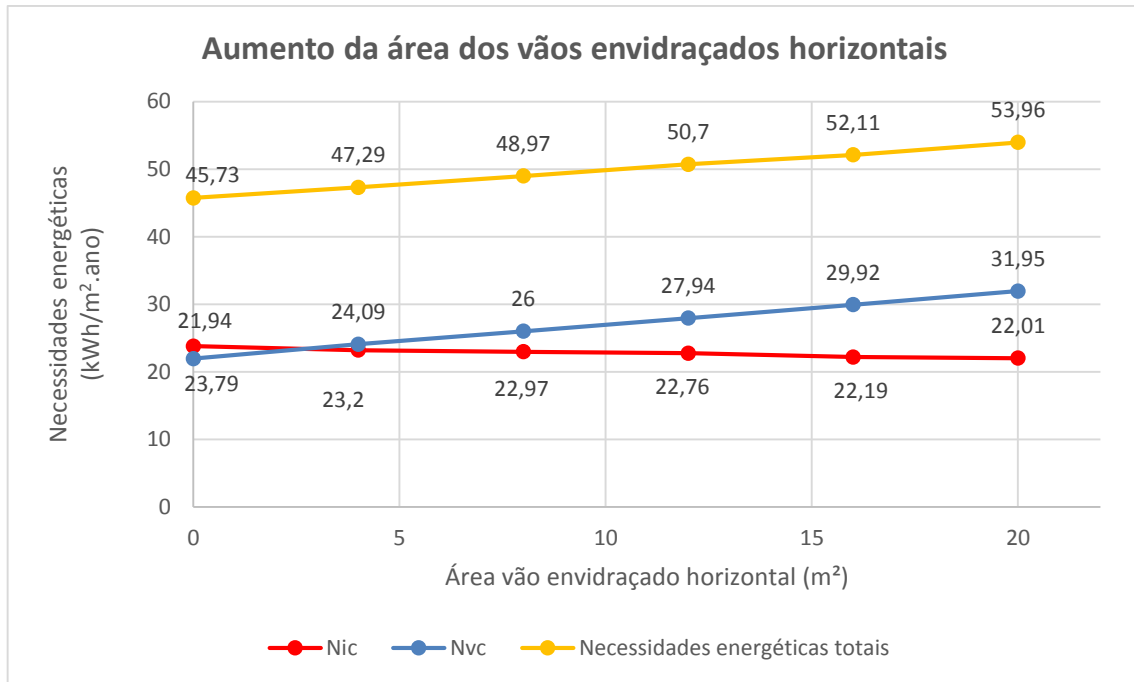


Figura 4.16 - Evolução de Nic, Nvc e necessidades energéticas totais com o aumento da área de vão envidraçado horizontal

Analisando ainda o gráfico, é importante salientar que se fosse introduzida outra claraboia no edifício em estudo, este passaria a estar em situação não regulamentar segundo o RCCTE, pois as necessidades de arrefecimento ultrapassariam o valor imposto pelo regulamento (32 kWh/m².ano).

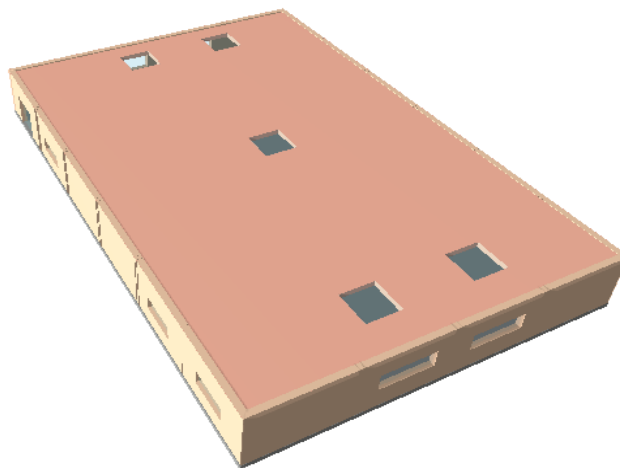


Figura 4.17 - Vista 3D do edifício monozona com as claraboias colocadas

Para terminar falta mencionar que a utilização de claraboias em edifícios como por exemplo o deste estudo, que funcionem apenas durante o dia, fará com que os gastos em iluminação artificial sejam menores. Foi realizado, por curiosidade, um pequeno teste no

cypeterm: reduziu-se a potência de iluminação no edifício em causa já com as claraboias e compararam-se os valores das potências de aquecimento e arrefecimento antes e depois. Naturalmente que se observou uma redução das necessidades, contudo essa redução não é suficiente para compensar a introdução das claraboias. No entanto, foi um teste pouco preciso pois não é fácil contabilizar quanto se poupa em termos de iluminação quando se utiliza esta solução construtiva (seria necessário realizar um estudo luminotécnico).

4.4 Varandins Interiores

Outra solução construtiva cada vez mais utilizada em Portugal são os varandins interiores, conhecidos também por *mezzanines*. É uma solução que permite aproveitar melhor o espaço interior de um edifício, aumentando a sua área útil. No entanto, normalmente, para se colocar uma solução deste tipo exige que o edifício tenha um pé direito algo considerável.

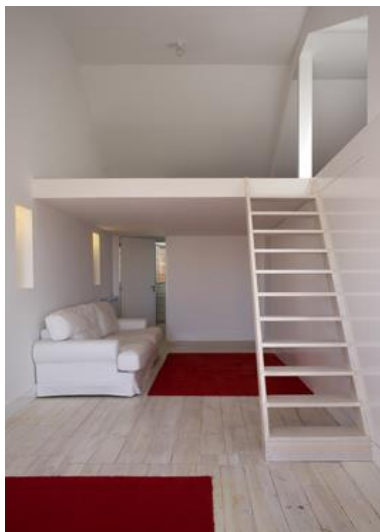


Figura 4.18 - Exemplo ilustrativo de um *mezzanine*

Para se estudar o efeito desta solução construtiva alterou-se o pé direito do caso de estudo de 3m para 5m, colocou-se um varandim interior e foi se aumentando progressivamente a sua área, para se estudar a evolução das necessidades de aquecimento e arrefecimento. A área útil que aparece na tabela 4.3 é igual à área do pavimento mais a área do varandim interior. Referir ainda, que esta alteração ao contrário das outras foi realizada no RCCTE-STE, pois demonstrou ser mais prático e rápido na colocação deste elemento num edifício. Assim sendo na tabela seguinte serão demonstrados os resultados alcançados.

Tabela 4.3 - Resultados obtidos com a introdução de um *mezzanine* e consequente aumento de área

Pé direito (m)	Área do pavimento (m ²)	Área útil (m ²)	Necessidades Nominais	
			Aquecimento (kWh/m ² .ano)	Arrefecimento (kWh/m ² .ano)
3	600	600	24,71	22,47
5	600	600	35,11	20,35
5	600	700	31,09	19,40
5	600	800	28,14	18,97
5	600	900	25,61	18,41
5	600	1000	23,88	17,97
3	1000	1000	15,50	20,27

Como esperado, devido às fórmulas de cálculos das necessidades energéticas (ver o capítulo 2 desta dissertação), ao introduzir um varandim interior e aumentar a sua área o valor das necessidades energéticas vai diminuindo como se constata pelas duas últimas colunas da tabela 4.3. Todavia esta solução construtiva torna-se apenas uma boa opção quando o espaço tem um pé direito algo considerável (considera-se neste trabalho que os *mezzanines* têm a capacidade de ter uma pessoa em pé, pois existem *mezzanines* para outras utilidades). Pois, entre construir um espaço com este tipo de solução e um espaço sem ela mas com a mesma área útil, será preferível a segunda opção como comprovado pelas duas últimas linhas da tabela 4.3. Em termos percentuais, existe uma redução de cerca de 35% das necessidades energéticas de aquecimento face a um aumento de cerca de 11% das necessidades energéticas de arrefecimento, nesta última comparação.

Em suma, pode-se afirmar que este tipo de solução é uma boa opção para edifícios já existentes, que tenham um pé direito algo considerável, e quanto maior for a sua área melhor será em termos energéticos, como já demonstrado. Caso contrário, é mais vantajoso construir um espaço com um pé direito mais reduzido e com a mesma área útil do que com o *mezzanine*.

4.5 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram realizadas várias alterações construtivas ao edifício estudado no capítulo 3, de modo a perceber a sua importância na caracterização energética do edifício. Os resultados atingidos com auxílio dos programas de simulação de edifícios, não apresentaram qualquer surpresa conseguindo transmitir o objetivo principal deste capítulo. Ficou provado que

para conseguir projetar edifícios com elevado desempenho energético, e conseguir assim contribuir para a sustentabilidade energética, é necessário conhecer ao pormenor todos os parâmetros construtivos utilizados na sua construção e qual o efeito da sua utilização em termos energéticos.

Em relação aos programas, ficou mais uma vez provado que o *Cypeterm*, com a sua facilidade de introdução/alteração de elementos construtivos é uma melhor opção face ao RCCTE-STE. O facto de o primeiro conseguir mostrar uma renderização do edifício, também ajudou para se conseguir entender melhor as alterações realizadas a nível estético no edifício.

5. Caso de Estudo Multizona

Como já referido no capítulo 2 deste trabalho, no âmbito do RSECE, a simulação dinâmica detalhada é vista como um método de previsão das necessidades energéticas correspondentes ao funcionamento de um edifício e respetivos sistemas energéticos, que toma em consideração a evolução a todos os parâmetros ao longo do ano. Por outro lado este tipo de simulação, ao contrário da simulação dinâmica simplificada utilizada pelo programa RCCTE-STE, permite uma análise multizona do desempenho energético do edifício, ou seja, possibilita que sejam consideradas e simuladas simultaneamente múltiplas zona dentro do mesmo edifício.

Posto isto, neste capítulo será feito um estudo de um edifício com características construtivas semelhantes ao edifício descrito no capítulo 3 mas como uma área superior e com diversas divisões no seu interior, deixando portanto, de funcionar em *open-space*. Sendo assim, o capítulo começará com a descrição desse mesmo edifício a ser estudado que será designado por edifício multizona. De seguida, será feita uma breve comparação monozona entre os resultados apresentados pelo RCCTE-STE e *Cypeterm*, embora nesta situação seja contemplado um novo parâmetro que não foi estudado no capítulo 3, o IEE (Indicador de Eficiência Energética). Posteriormente serão colocadas paredes interiores no edifício criando assim diferentes espaços dentro do próprio. Para terminar será realizada uma comparação entre a simulação monozona e a multizona, bem como uma análise crítica a todos os resultados alcançados.

5.1 Definição do Caso de Estudo Multizona

Começando pela localização e zona climática do edifício multizona, são as mesmas que no edifício estudado no capítulo 3. Ou seja, o edifício situa-se em Lisboa, no Parque das Nações, numa zona climática de Inverno I_1 e de Verão V_2 .

Relativamente à estrutura do edifício vão existir algumas modificações. O edifício multizona terá uma área útil de 1249,16 m² e um formato retangular com dimensões de 50 m x 25 m, como se pode observar no anexo D. Em relação ao pé direito mantem-se inalterado, ou seja 3m.

Neste caso, a construção contém três diferentes tipos de pilares, os pilares de canto, os pilares de parede e os pilares interiores. Os primeiros, como o nome sugere estão colocados nos cantos do edifício. Estes pilares têm secção quadrada com lado de 0,20 m. Os pilares interiores (existem 21 pilares deste tipo), que têm a função de suportar o peso da cobertura, possuem uma

secção igual à dos pilares de canto. Por fim os pilares de parede, que se encontram espalhados ao longo do perímetro do edifício e dentro das paredes, têm uma secção retangular com os lados maiores a medirem 0,4 m enquanto os menores 0,15 m. Estes pormenores podem ser analisados mais uma vez no anexo D.

No que concerne aos elementos da envolvente, as suas características mantiveram-se praticamente iguais às do caso de estudo monozona, isto é, os coeficientes globais de transmissão térmica de elementos como para as paredes exteriores, pavimento, cobertura, PTP's e vãos envidraçados são iguais aos demonstrados no subcapítulo 3.1.3 deste trabalho. Em relação à inércia térmica, apesar de se manter na mesma classe, classe média, o valor da massa superficial útil por metro quadrado da área de pavimento aumentou um pouco o seu valor ($I_t = 286,90$). Ainda não foi referido, mas, naturalmente, que as áreas de todos estes elementos aumentaram com o aumento das dimensões do edifício.

Para terminar, em relação aos parâmetros de funcionamento deste edifício são os mesmos utilizados no primeiro caso de estudo exceto a ventilação, ou seja, os que se encontram resumidos na tabela 3.5. O novo valor de ventilação passou a ser 28,8 m³/h por ocupante ou 6246 m³/h por compartimento. No anexo F podem ser consultados os perfis de ocupação, iluminação, equipamento e ventilação.

5.2 Comparação monozona

Com todos os dados anteriores inseridos nos dois programas, da mesma maneira explicada no capítulo 3, obtiveram-se os parâmetros comuns entre os dois programas passíveis de comparação: IEE, potências de aquecimento e arrefecimento bem como as necessidades energéticas ao longo do ano para as estações de referência. Referir que este caso de estudo, sendo um edifício com mais de 1000 m² de área, vai estar enquadrado com o RSECE, pelo que, parâmetros referentes ao RCCTE como Nic e Nvc, entre outros, deixam de existir como *outputs* dos programas.

5.2.1 Cargas térmicas e necessidades energéticas

Na figura seguinte apresentam-se os valores das cargas térmicas máximas obtidos com os programas *Cypeterm* e RCCTE-STE. Já na figura 5.2 e figura 5.3 expõem-se os valores comparativos das necessidades térmicas de aquecimento e arrefecimento, respetivamente.

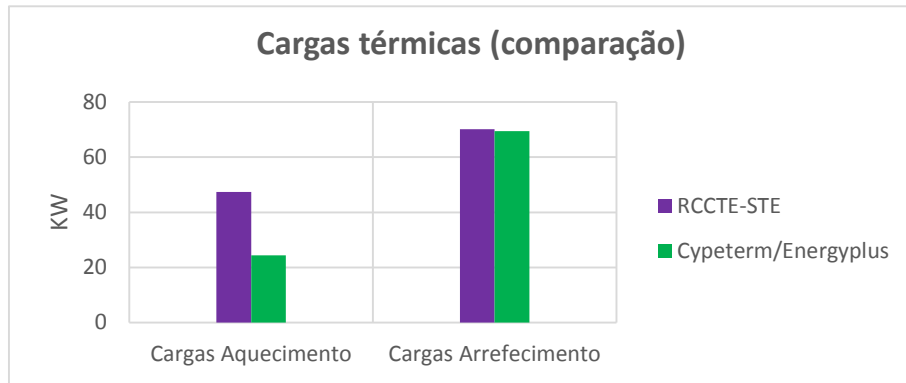


Figura 5.2 - Comparação das cargas de aquecimento e arrefecimento obtidas pelos dois programas

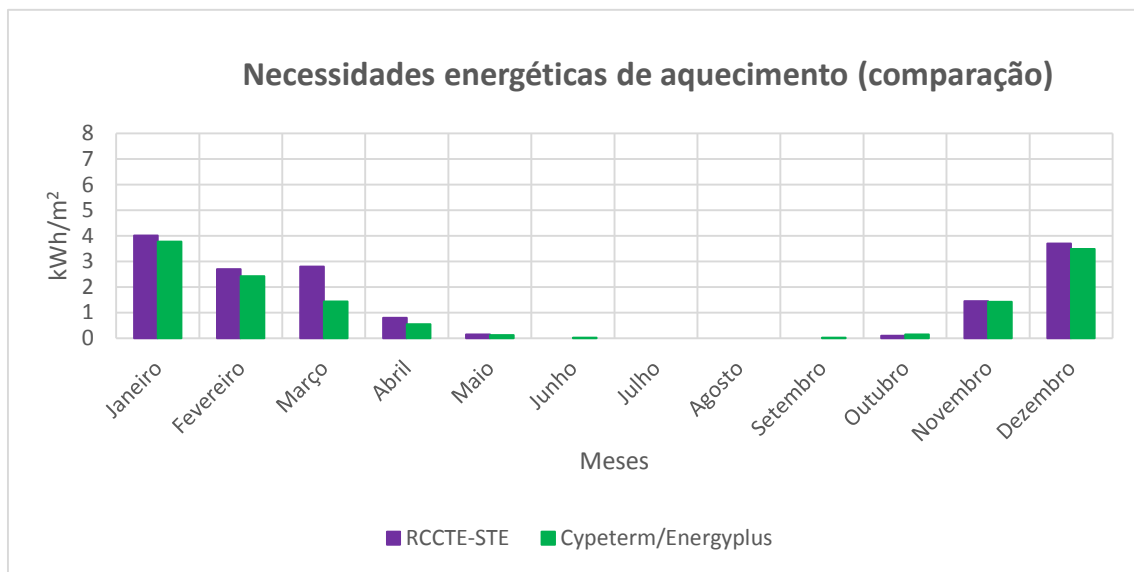


Figura 5.3 - Comparação das necessidades energéticas de aquecimento obtidas pelos dois programas

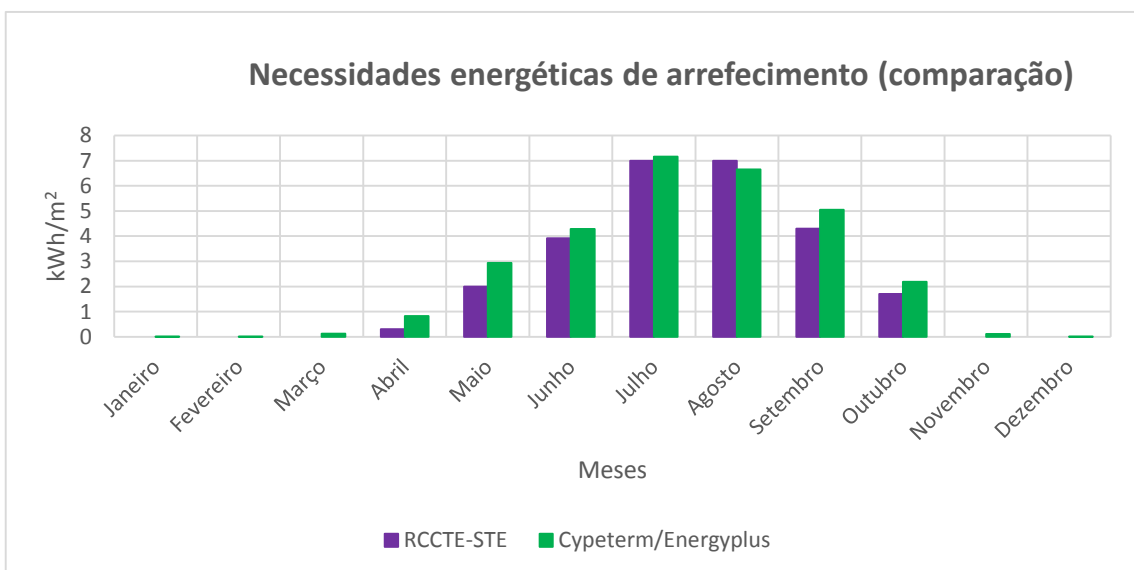


Figura 5.1 - Comparação das necessidades energéticas de arrefecimento obtidas pelos dois programas

Nas figuras anteriores, constata-se o já discutido na análise de resultados do capítulo 3 (subcapítulo 3.5). Em termos de cargas térmicas observa-se, uma vez mais, uma discrepância bastante elevada entre os valores obtidos pelos dois programas nas cargas de aquecimento, que em termos percentuais, revelam uma diferença de cerca de 48%. Já nas cargas de arrefecimento os valores foram muito semelhantes.

No que diz respeito às necessidades energéticas a diferença entre os valores apresentados foi semelhante à já vista na primeira comparação entre os programas. Nas necessidades energéticas de aquecimento encontrou-se uma diferença de 15%, enquanto nas de arrefecimento uma divergência de 11%.

5.2.2 Indicador de Eficiência Energética (IEE)

O IEE é sem dúvida um parâmetro determinante em qualquer simulação térmica de edifícios. Portanto, antes de se comparar os resultados obtidos pelos dois programas é determinante perceber o seu significado.

O IEE é calculado a partir dos consumos nominais ou reais de energia de um edifício durante um ano, englobando a totalidade dos consumos de climatização, iluminação, equipamentos, AQS, elevadores, etc, convertido para energia primária, utilizando os fatores de conversão definidos em função do *mix* energético nacional. Essencialmente este parâmetro traduz o consumo de energia primária de um edifício ou fração, por metro quadrado e por ano. Quanto maior for o valor do IEE determinado, maior será o consumo energético e, por consequência, menor será a eficiência energética do edifício em estudo.

Como já referido, o edifício em estudo neste capítulo está abrangido pelo RSECE visto a sua área ser superior a 1000 m². Segundo o artigo 7º do mesmo regulamento, o estudo energético do edifício, nomeadamente a determinação do IEE, é realizado através das seguintes metodologias:

- Abordagem Simplificada – Análise de faturas energéticas
- Auditoria Energética – simulação e análise

O RCCTE-STE dá-nos o valor do IEE enquanto o *Cypeterm* não. Neste sentido, de seguida, calcula-se o valor do IEE manualmente com base nos resultados obtidos no programa.

Como já mencionado, o IEE é determinado a partir dos consumos efetivos de energia de um edifício durante um ano, convertidos, utilizando os fatores de conversão, para uma base de energia primária.

- Eletricidade: 0,290 kgep/kWh;
- Combustíveis sólidos, líquidos e gasosos: 0,086 kgep/kWh.

O IEE é calculado pela seguinte equação:

$$IEE = IEE_I + IEE_V + \frac{Q_{out}}{A_p} \quad 34)$$

Onde:

IEE – indicador de eficiência energética (kgep/m².ano);

IEE_I – indicador de eficiência energética de aquecimento (kgep/m².ano);

IEE_V – indicador de eficiência energética de arrefecimento (kgep/m².ano);

Q_{out} – consumo de energia não ligado aos processos de aquecimento e arrefecimento (kgep.ano);

A_p – área útil de pavimento (m²).

Por sua vez:

$$IEE_I = \frac{Q_{aq}}{A_p} \times F_{CI} \quad 35)$$

$$IEE_V = \frac{Q_{arr}}{A_p} \times F_{CV} \quad 36)$$

Onde:

Q_{aq} – consumo de energia de aquecimento (kgep/ano);

F_{CI} – fator de correção do consumo de energia de aquecimento;

Q_{arr} – consumo de energia de arrefecimento (kgep/ano)

F_{CV} – fator de correção do consumo de energia de arrefecimento.

Para o cálculo dos fatores de correção de consumo de energia de aquecimento e arrefecimento (F_{CI} e F_{CV}), adota-se, como região climática de referência, a região I1-V1 norte, 1000 graus-dia de aquecimento e 160 dias de duração da estação de aquecimento.

A correção da energia de aquecimento é expressa pela seguinte equação:

$$F_{CI} = \frac{N_{I1}}{N_{Ii}} \quad 37)$$

Onde:

N_{I1} - necessidades máximas de aquecimento permitidas pelo RCCTE, calculadas para o edifício em estudo, como se estivesse localizado na zona de referência I1 (kWh/m².ano);

N_{Ii} - necessidades máximas de aquecimento permitidas pelo RCCTE, calculadas para o edifício em estudo, na zona onde está localizada o edifício (kWh/m².ano).

A correção da energia de arrefecimento é dada por:

$$F_{CV} = \frac{N_{V1}}{N_{Vi}} \quad 38)$$

Onde:

N_{V1} - necessidades máximas de arrefecimento permitidas pelo RCCTE, calculadas para o edifício em estudo, como se estivesse localizado na zona de referência I1-V1 (kWh/m².ano);

N_{Vi} - Necessidades máximas de aquecimento permitidas pelo RCCTE, calculadas para o edifício em estudo, na zona onde está localizada o edifício (kWh/m².ano).

Os dados do RCCTE obtidos pelo *Cypterm*, utilizados no cálculo do IEE são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 5.1 - Dados provenientes do RCCTE

Ap (m²)	Taxa Ren. (RPH)	Nic (kWh/m².a no)	Ni (kWh/m². ano)	Nvc (kWh/m². ano)	Nv (kWh/m². ano)	FF³
1249,16	0,60	20,41	51,51	24,77	32	0,45

Falta apenas analisar os consumos anuais do edifício para se poder realizar o cálculo do IEE, que se apresentam de seguida.

³ Fator de forma é o quociente entre o somatório das áreas da envolvente exterior (A_{ext}) e o interior (A_{int}) do edifício ou fração autónoma com exigências térmicas e o respetivo volume interior (V) correspondente, conforma a fórmula seguinte: $FF = [A_{ext} + \sum(\tau A_{int})_i]/V$ em que τ é definido no anexo IV do RCCTE.

Tabela 5.2 - Consumos anuais do edifício

Uso de energia	Consumos (kWh/ano)
Aquecimento	25491,39
Arrefecimento	30946,96
Iluminação	32301,7
Equipamento	64172,8
AQS	0

Assim, substituindo a equação 34 pelos respetivos dados, obtêm-se:

$$IEE = \left(\frac{\left(\frac{25491,93}{4} \right) * 0,29}{1249,16} * \frac{44}{51,51} \right) + \left(\frac{\left(\frac{30946,96}{3} \right) * 0,29}{1249,16} * \frac{32}{32} \right) + \frac{(32301,7 + 64172,8) * 0,29}{1249,16} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow IEE = 26,05 \text{ kgep}/(m^2 \cdot \text{ano})$$

A determinação da classe energética do edifício em estudo deverá ser realizada com recurso à tabela apresentada de seguida, sendo a classe a atribuir aquela que corresponder à condição verdadeira verificada numa escala de 9 classes possíveis.

Tabela 5.3 - Classes energéticas para edifícios

Classe energética	Condição a verificar
A +	$IEE_{nom} \leq IEE_{ref, novos} - (0,75 \times S)$
A	$IEE_{ref, novos} - (0,75 \times S) < IEE_{nom} \leq IEE_{ref, novos} - (0,5 \times S)$
B	$IEE_{ref, novos} - (0,5 \times S) < IEE_{nom} \leq IEE_{ref, novos} - (0,25 \times S)$
B -	$IEE_{ref, novos} - (0,25 \times S) < IEE_{nom} \leq IEE_{ref, novos}$
C	$IEE_{ref, novos} < IEE_{nom} \leq IEE_{ref, novos} + (0,5 \times S)$
D	$IEE_{ref, novos} + (0,5 \times S) < IEE_{nom} \leq IEE_{ref, novos} + S$
E	$IEE_{ref, novos} + S < IEE_{nom} \leq IEE_{ref, novos} + (1,5 \times S)$
F	$IEE_{ref, novos} + (1,5 \times S) < IEE_{nom} \leq IEE_{ref, novos} + (2,0 \times S)$
G	$IEE_{ref, novos} + (2,0 \times S) < IEE_{nom}$

O fator S para Escritórios, segundo o anexo IV do despacho nº 10250/2008, é de 15. Já o valor do $IEE_{ref, novos}$ é $35 \text{ kgep}/(m^2 \cdot \text{ano})$, segundo o anexo XI do RSECE.

Os valores dos indicadores de eficiência energética apresentados pelos dois programas revelaram-se bastante próximos, como se pode comprovar na tabela seguinte. Em termos percentuais existe uma divergência de cerca de 6% nos resultados apresentados.

Tabela 5.4 - Resultados do IEE e classe energética para os dois programas

	Programa	$IEE_{ref, novos}$ ($\text{kgep}/(m^2 \cdot \text{ano})$)	IEE ($\text{kgep}/(m^2 \cdot \text{ano})$)	Classe energética
Edifício multizona	RCCTE-STE	35	24,5	A
	<i>Cypeterm</i>	35	26,05	A



5.3 Comparação monozona vs multizona

Neste subcapítulo será então realizada a simulação multizona do edifício em estudo no programa *Cypeterm*. Começa-se por introduzir paredes interiores ao edifício multizona criando assim várias divisões dentro do espaço. Seleccionaram-se paredes interiores com a menor espessura possível com o intuito de alterar pouco a inércia térmica do edifício original, de modo a que se consiga realizar uma comparação monozona vs multizona da maneira mais fidedigna possível. No entanto, logicamente que o valor da inércia térmica aumenta um pouco, pois ao introduzir-se as referidas paredes o valor da área útil do pavimento diminuem, aumentando assim o valor da inércia. Note-se ainda que as novas paredes introduzidas também entraram no cálculo da inércia térmica, como se pode observar no anexo E. Esse aumento de inércia, em termos percentuais, foi de cerca de 6%. Então essas paredes interiores têm 5 cm de espessura total e um coeficiente global de transmissão térmica, $U_{p,interiores}$, igual a $0,70 \text{ W}/m^2 \cdot ^\circ\text{C}$. A colocação destas paredes no programa *Cypeterm* foi realizada com auxílio de um desenho de *AutoCAD*, como explicado no caso monozona para as paredes exteriores e restantes elementos construtivos.

De seguida têm que se definir os vários compartimentos dentro do próprio edifício. O edifício será constituído por 13 gabinetes, 3 salas de reuniões, 1 corredor e 1 hall de entrada. Todos os parâmetros de cálculo para o estudo térmico do edifício definidos em cada compartimento, foram iguais aos utilizados no caso de estudo interior exceto a ventilação. Os valores de ventilação para cada compartimento foram determinados com ajuda do programa

RCCTE-STE, mais precisamente na secção “Calcular o caudal mínimo de ar novo...”. Aqui basta colocar a área do compartimento em questão, o tipo de atividade (neste caso: serviços - gabinetes) e a densidade de ocupação para obter a ventilação em m^3/h . Utilizou-se este programa para realizar este cálculo pois já se encontrava instalado no computador, no entanto, existem na *internet* várias opções dedicadas apenas para o efeito. Posto isto, na tabela 5.5 apresentam-se os parâmetros utilizados para cada um dos compartimentos bem como as respetivas áreas úteis. No anexo D poderá ser observada a planta deste edifício desenhada no programa *AutoCAD*.

Tabela 5.5 - Parâmetros de funcionamento do edifício multizona

Compartimento	Área (m^2)	Ocupação ($\text{m}^2/\text{ocupante}$)	Iluminação (W/m^2)	Equipamento (W/m^2)	Ventilação (m^3/h)
Gabinetes 6,7 e 8	51,8	15	10	15	430
Restantes gabinetes	39,1	15	10	15	193
Sala de reuniões 1 e 3	78,1	15	10	15	388
Sala de reuniões 2	153,8	15	10	15	806
Corredor	239,1	15	10	15	1174
Hall de entrada	156,3	15	10	15	778

Há que salientar que se optou por colocar os mesmos parâmetros para todos os compartimentos, de modo a que seja feita a comparação entre a simulação monozona e a multizona da melhor forma possível. Contudo na realidade, um edifício possui em cada compartimento parâmetros diferentes. Isto é, na prática uma sala de reuniões por exemplo, não tem a mesma densidade de iluminação, equipamento ou ocupação de um corredor ou de um hall de entrada.

Em relação à fração autónoma foi definida com os mesmos parâmetros utilizados no caso de estudo monozona (ver subcapítulo 3.2).

Já com o edifício multizona todo parametrizado no *Cypeterm*, a fração autónoma definida e todos os compartimentos caracterizados como já explicado, passa-se então à simulação multizona no programa e respetiva exportação para o *Energyplus*.

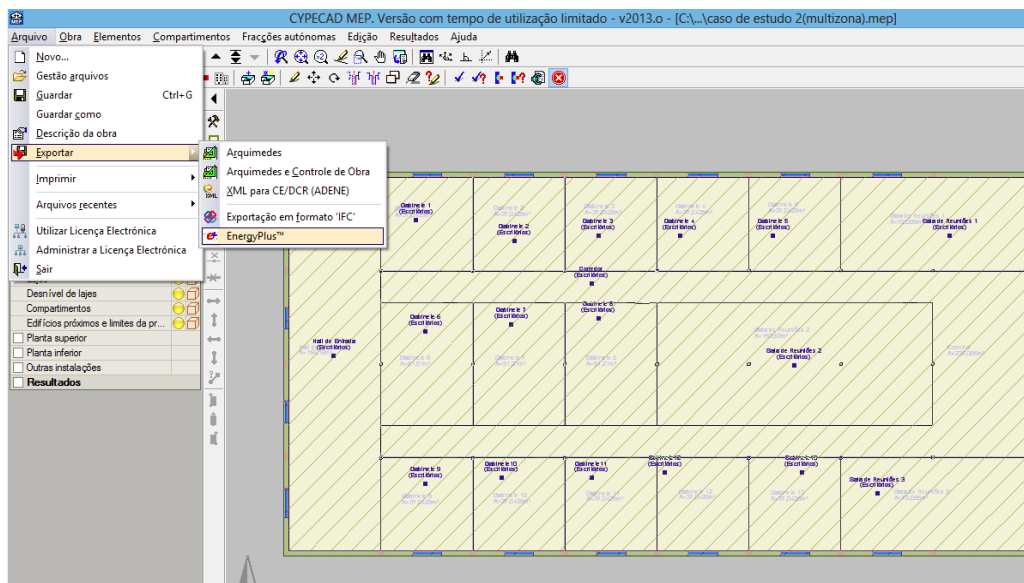


Figura 5.4 - Simulação multizona e exportação para o EnergyPlus, no Cypeterm

5.3.1 Resultados

Apresentam-se de seguida os resultados da simulação multizona em comparação com os obtidos na simulação monozona realizada no subcapítulo 5.2 com o programa *Cypeterm*. Os parâmetros a comparar serão o IEE, as necessidades energéticas totais ao longo do ano e as cargas de aquecimento e arrefecimento.

Nas figuras 5.6 e 5.7 apresentam-se os valores comparativos das necessidades energéticas totais do edifício em estudo, para as estações de aquecimento e arrefecimento, respetivamente.

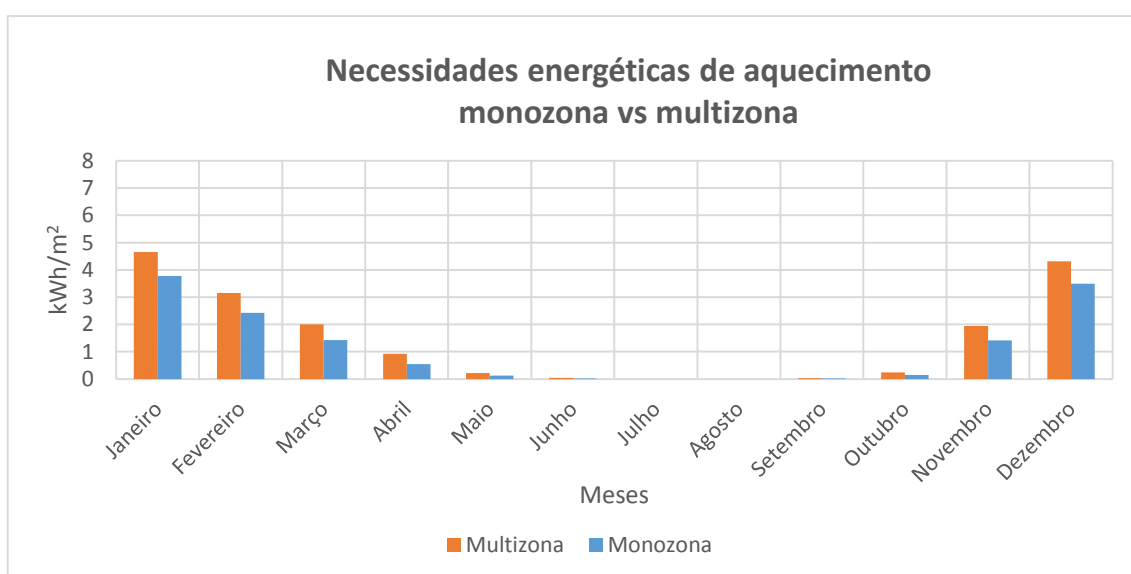


Figura 5.5 - Comparação das necessidades energéticas de aquecimento (monozona vs multizona)

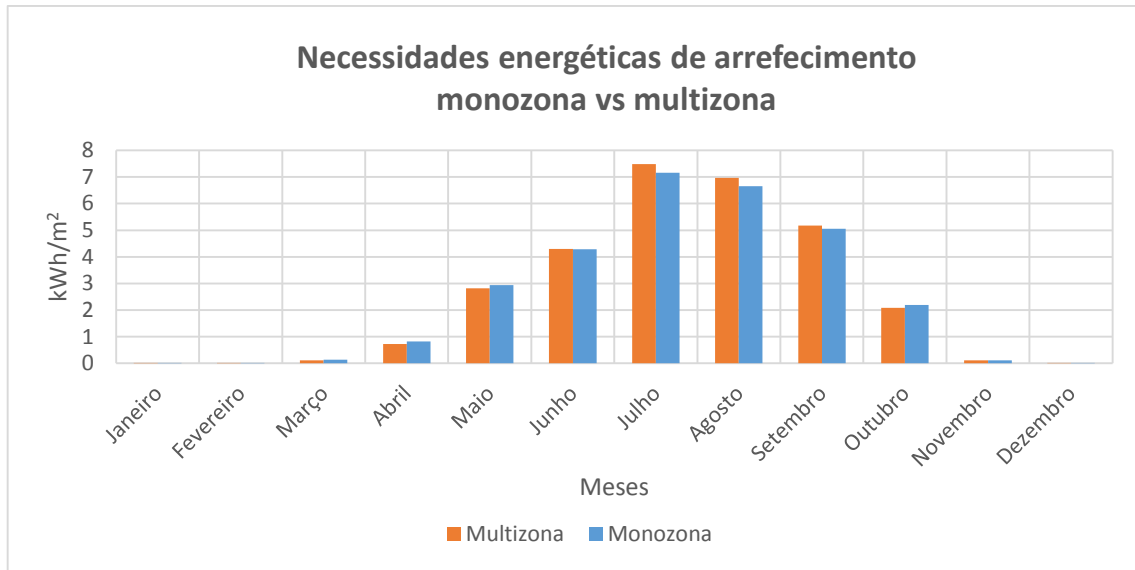


Figura 5.6 - Comparação das necessidades energéticas de arrefecimento (monozona vs multizona)

De seguida demonstram-se as cargas térmicas obtidas pelos dois programas, para um dia de Inverno (18 de Dezembro) e para um dia de Verão (4 de Julho), respetivamente.

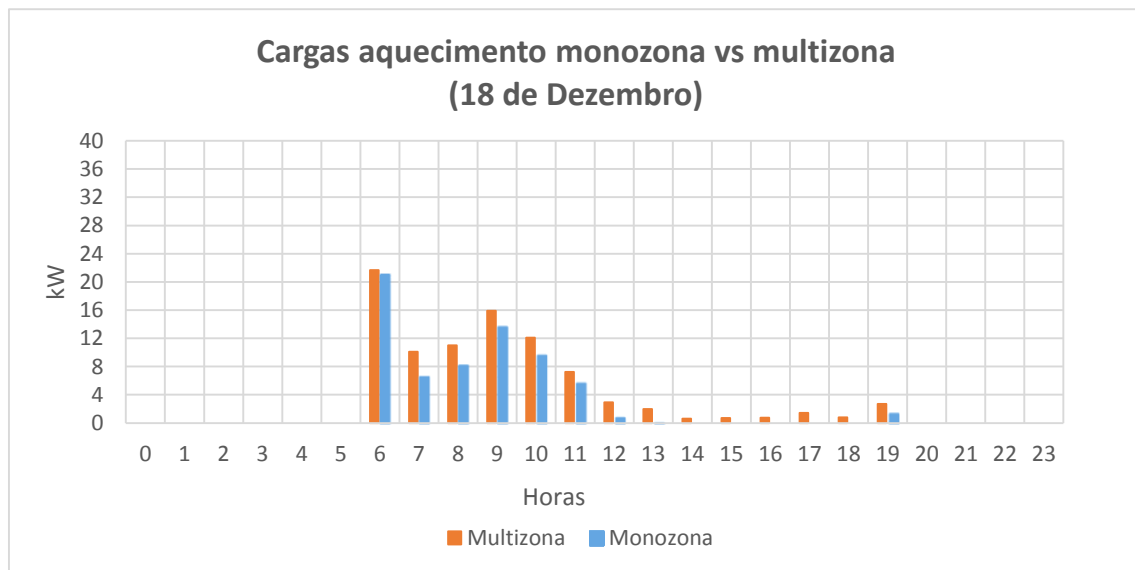


Figura 5.7 - Cargas térmicas de aquecimento no dia 18 de Dezembro (monozona vs multizona)

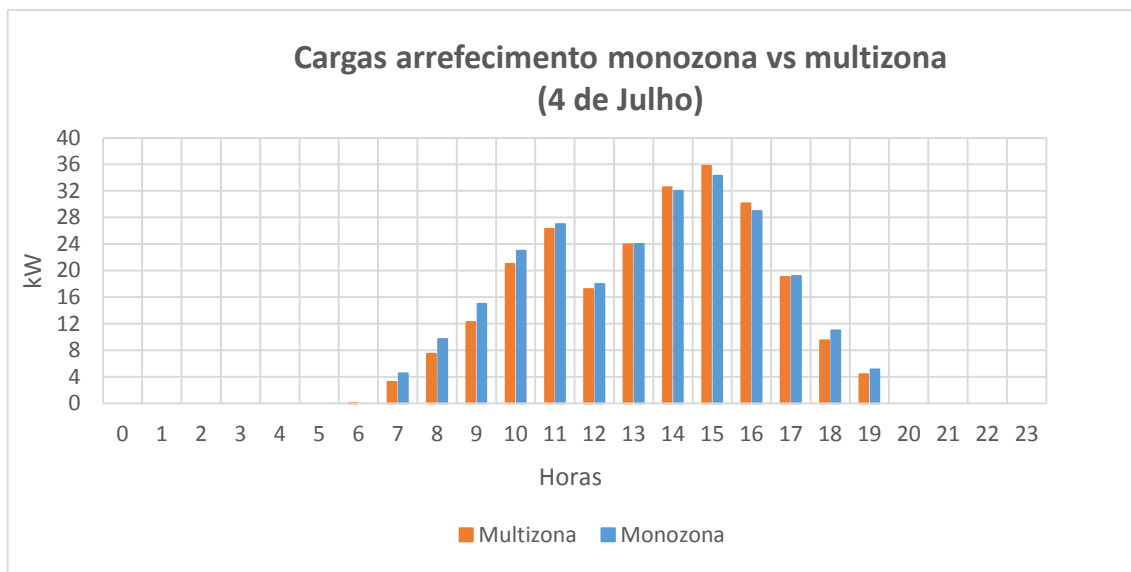


Figura 5.8 - Cargas térmicas de arrefecimento no dia 18 de Dezembro (monozona vs multizona)

5.3.2 Análise de resultados

Analisando a figura 5.5 constate-se que as necessidades energéticas de aquecimento ao longo do ano são superiores na simulação multizona. Em termos percentuais, revela-se um aumento total de cerca de 23%. Já em termos de necessidades de arrefecimento, como se pode ver no gráfico 5.6, o aumento que existiu comparativamente à simulação monozona é bem menos acentuado do que o observado nas necessidades de aquecimento, sendo cerca de 2% em termos percentuais.

Em relação às cargas térmicas para um dia de Inverno (18 de Dezembro) e para um dia de Verão (18 de Julho), como se pode ver nos gráficos anteriores, seguem a tendência das necessidades energéticas. Ou seja, as cargas térmicas de arrefecimento apresentam valores bastante semelhantes entre as duas simulações enquanto nas cargas de aquecimento essa diferença é mais destacada.

O IEE na simulação multizona, como seria de esperar, apresentou um valor ligeiramente mais baixo comparativamente com a simulação monozona, devido ao facto da área útil de ser mais pequena. Em termos percentuais, esse decréscimo foi praticamente desprezável, sendo cerca de 1,2%, mantendo-se na mesma classe energética (A). Refere-se ainda, que o IEE numa simulação multizona é calculado consoante as tipologias existentes num edifício (escritório, museu, restaurante, banco, etc.). Neste caso de estudo apenas existe uma, porém, se existissem

diferentes tipologias no mesmo edifício o IEE global teria que ser determinado com base no valor médio ponderado de acordo com as áreas correspondentes a cada uma das tipologias existentes.

Uma das razões que origina esta discrepância entre os resultados obtidos é a ventilação. Mais uma vez, como também já observado na figura 4.1, uma grande percentagem das perdas no edifício é da responsabilidade da ventilação. Na situação multizona se se somarem todas os valores de ventilação dos vários compartimentos, constata-se que o total de ventilação neste caso é consideravelmente superior (cerca de 7%) que no caso monozona. Esse aumento levará logicamente ao aumento das necessidades energéticas na situação em que existem vários espaços dentro do edifício. Outra razão que possivelmente também levará a estas diferenças nos resultados será a ligeira redução da área útil do pavimento com a introdução as paredes interiores como já mencionado atrás.

Contudo, o objetivo principal desta comparação era perceber que a simulação multizona não é uma simples simulação monozona dividida pelos vários espaços consoante as suas respetivas áreas. Essencialmente, o programa *Cypeterm* utilizando o motor de cálculo do *Energyplus* numa simulação multizona detalhada, calcula a condução de calor através dos elementos construtivos em regime transiente, considerando as suas inércias térmicas. E, aqui é que difere da simulação monozona, calcula igualmente a transferência de ar entre as várias zonas dentro do próprio edifício, através de uma análise de nós, analisando ainda os sistemas de climatização, entre outros.

5.4 Resultados multizona

No subcapítulo anterior foram apenas demonstrados os resultados, da simulação multizona, globais do edifício em estudo. Porém este tipo de simulação, como já dito atrás, permite fazer um estudo detalhado de cada um dos compartimentos presentes na construção.

Uma vez feita a simulação, é possível visualizar no ecrã as necessidades de aquecimento e de arrefecimento mensal de todos os compartimentos do edifício. É ainda possível visualizar as cargas de aquecimento, em intervalos de tempo (*time-step*) de uma hora, de todos os espaços do edifício para um dia selecionado do ano (um dia de Inverno) e de arrefecimento para outro dia (um dia de Verão).

5.4.1 Necessidades energéticas por compartimento

De seguida, serão apresentadas as necessidades térmicas de aquecimento (tabela 5.6) e arrefecimento (tabela 5.7) do edifício em estudo por compartimento.

Tabela 5.6 – Necessidades energéticas de aquecimento por compartimento

Espaço	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Gabinete 1	5,2	3,62	2,26	1,08	0,22	0,03	0	0	0,03	0,29	2,26	4,91	19,9
Gabinete 6	7,52	5,47	3,79	2,19	0,6	0,11	0,04	0,03	0,07	0,55	3,53	7,1	31
Gabinete 9	3,23	2,09	1,43	0,59	0,18	0,04	0	0	0,01	0,11	1,14	2,74	11,57
Hall de Entrada	4,99	3,35	1,94	0,74	0,14	0,03	0	0	0,02	0,19	1,94	4,57	17,9
Corredor	3,77	2,37	1,4	0,52	0,11	0,02	0	0	0,02	0,18	1,54	3,55	13,46
Sala de Reuniões 1	5,35	3,57	2,13	0,88	0,15	0,02	0	0	0,02	0,24	2,26	5,05	19,69
Sala de Reuniões 2	3,98	2,75	1,69	0,84	0,22	0,06	0,02	0,01	0,04	0,23	1,65	3,76	15,25
Sala de Reuniões 3	3,98	2,51	1,58	0,56	0,13	0,02	0	0	0,01	0,12	1,45	3,53	13,89
Total	4,65	3,15	2	0,92	0,22	0,04	0,01	0,01	0,03	0,24	1,94	4,31	17,52

Tabela 5.7 - Necessidades energéticas de arrefecimento por compartimento

Espaço	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Gabinete 1	0,01	0,01	0,03	0,59	2,59	4,15	7,18	6,5	4,71	1,67	0,04	0,01	27,48
Gabinete 6	0,01	0,01	0,01	0,37	2,27	3,8	7,31	6,76	4,9	1,34	0,02	0,01	26,82
Gabinete 9	0,01	0,04	0,26	0,92	2,97	4,31	7,49	7,36	5,98	3,07	0,34	0,01	32,74
Hall de Entrada	0,01	0,01	0,14	0,93	3,35	4,91	8,36	7,62	5,57	2,32	0,11	0,01	33,33
Corredor	0,01	0,01	0,11	0,83	3,1	4,61	7,79	7,23	5,19	2,12	0,08	0,01	31,1
Sala de Reuniões 1	0,01	0,01	0,05	0,69	2,9	4,54	7,86	7,2	5,11	1,86	0,04	0,01	30,27
Sala de Reuniões 2	0,01	0,01	0,05	0,58	2,41	3,69	6,32	5,86	4,42	1,67	0,06	0,01	25,08
Sala de Reuniões 3	0,01	0,01	0,17	0,88	3,12	4,63	8,05	7,74	5,86	2,7	0,17	0,01	33,34
Total	0,01	0,01	0,11	0,72	2,82	4,3	7,48	6,97	5,18	2,09	0,11	0,01	29,81

Nas tabelas anteriores, para não se tornarem muito extensas, foram omitidos alguns gabinetes. No entanto esses gabinetes apresentam valores energéticos muito semelhantes aos da mesma orientação, que já se encontram na tabela. Ou seja, por exemplo a Norte, os gabinetes 1,2,3,4 e 5 apresentaram valores energéticos praticamente iguais daí só se representar o primeiro (ver a planta do edifício nos anexos). No entanto, o total apresentado nas referidas tabelas contempla todos os compartimentos.

De seguida são apresentadas graficamente as contribuições de cada compartimento relativamente às necessidades energéticas.

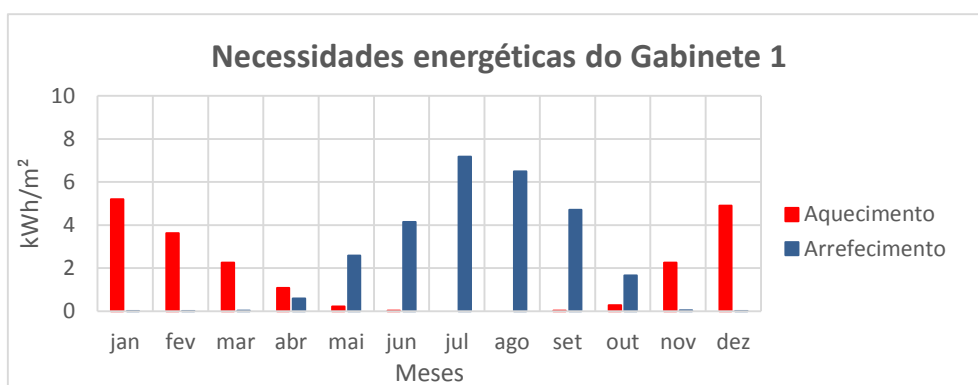


Figura 5.9 - Necessidades energéticas do Gabinete 1

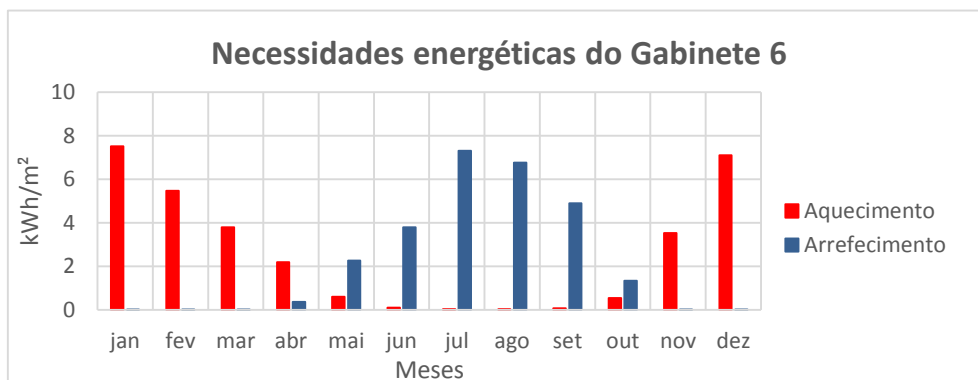


Figura 5.10 - Necessidades energéticas do Gabinete 6

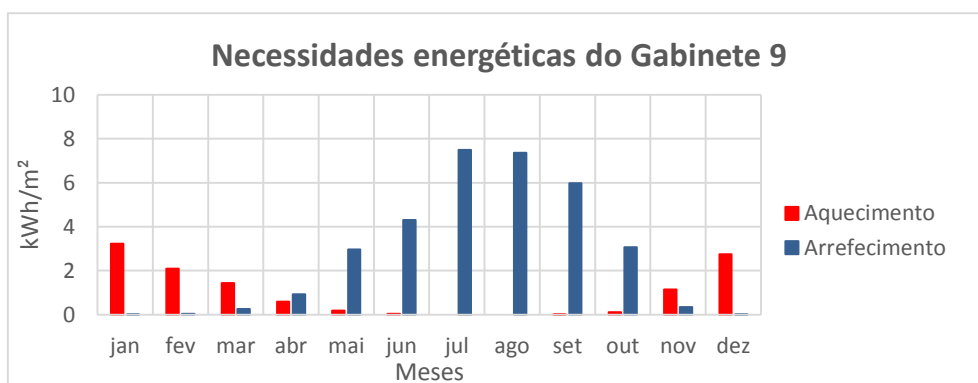


Figura 5.11 - Necessidades energéticas do Gabinete 9

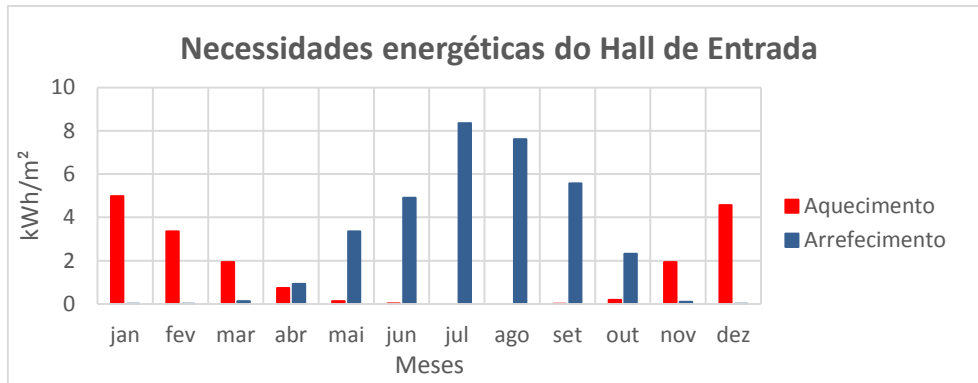


Figura 5.12 - Necessidades energéticas do Hall de Entrada

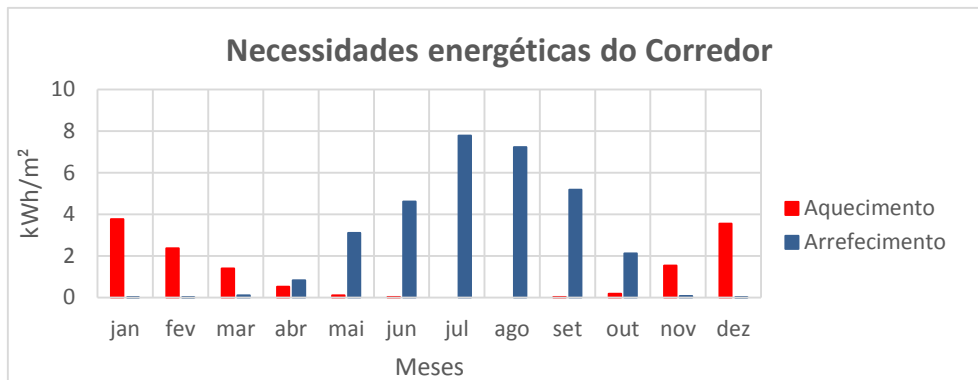


Figura 5.13 - Necessidades energéticas do Corredor

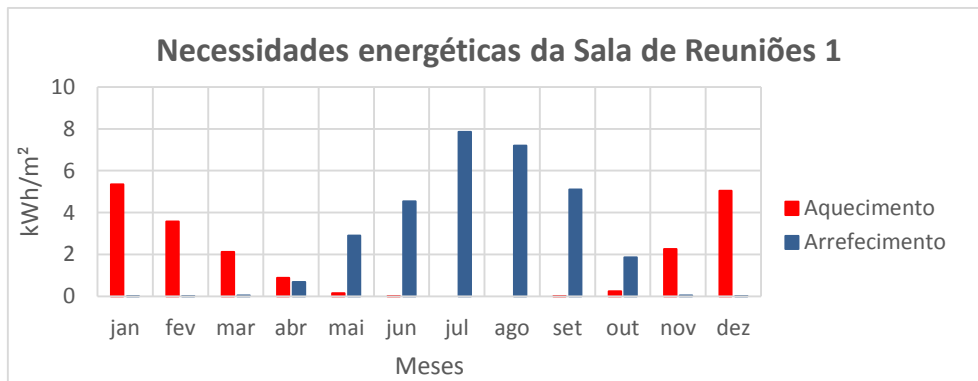


Figura 5.14 - Necessidades energéticas da Sala de Reuniões 1

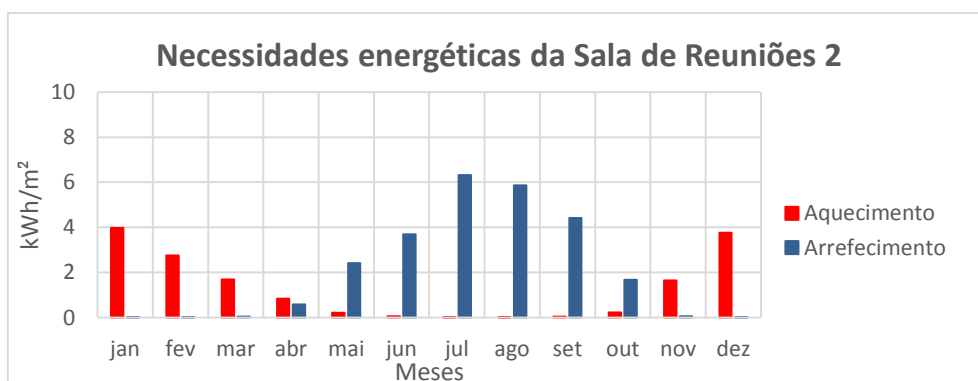


Figura 5.15 - Necessidades energéticas da Sala de Reuniões 2

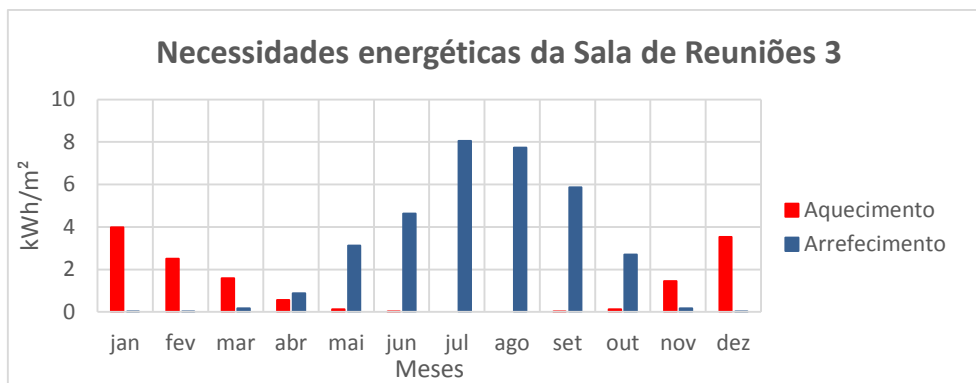


Figura 5.16 - Necessidades energéticas da Sala de Reuniões 3

Observando os resultados obtidos, repare-se nas contribuições de cada compartimento relativamente às necessidades energéticas do edifício em estudo, para o facto de Gabinete 6 (assim como os gabinetes 7 e 8) ser o compartimento que necessita mais de aquecimento, ao passo que, a Sala de Reuniões 3 o que necessita mais de arrefecimento. O facto de o Gabinete 6 ser um compartimento isolado, sem contacto com o exterior e não recebendo calor através dos raios solares, obriga a uma maior utilização do sistema de aquecimento de forma a atingir a temperatura de conforto. Já a Sala de Reuniões 3 é a maior divisão virada a Sul e sendo esta, a orientação com mais radiação solar, é normal que os maiores ganhos solares através dos vãos envidraçados levem a este resultado.

No sentido contrário, encontram-se o Gabinete 9 (assim como os gabinetes 10, 11, 12 e 13) e a Sala de Reuniões 2 pois são os compartimentos que tem menos necessidade de aquecimento e arrefecimento respectivamente. Pelo já analisado, seria expectável que os gabinetes virados a Sul seriam os que teriam menos necessidades de aquecimento. No que concerne à Sala de Reuniões 2, sendo um compartimento isolado, não recebe quaisquer radiações solares como já referido obrigando a uma menor necessidade energética durante a estação de arrefecimento.

Note-se ainda, que neste caso em particular os envidraçados e a orientação dos compartimentos tomam especial relevo pois, como explicado anteriormente, no edifício em estudo consideraram-se as mesmas densidades de iluminação, equipamentos e ocupação iguais em todos os espaços. Numa situação real, normalmente, estes parâmetros variando de uns espaços para outros levam a que quem esteja a realizar a simulação térmica do edifício os tenha em maior consideração, pois estes iram influenciar bastante os respetivos resultados energéticos de cada um dos espaços.

5.4.2 Cargas térmicas por compartimento

Uma das limitações encontrada no programa RCCTE-STE prende-se com a impossibilidade de determinar a evolução das cargas presentes no edifício com um *time-step* mais curto. Contudo, com o *Cypeterm* e o *EnergyPlus* é possível determinar as cargas hora a hora para cada um dos compartimentos como já mencionado. Assim, é possível saber qual o valor mínimo e máximo, sendo que estes correspondem às situações de carga máxima na estação de aquecimento e arrefecimento respetivamente, bem como em qual a hora do dia em que essas situações ocorrem. O estudo das cargas térmicas revela-se, portanto, determinante para qualquer projetista que tenha que dimensionar um sistema de climatização. Nesse sentido, neste trabalho optou-se por estudar três situações diferentes para análise das mesmas, que se apresentam de seguida.

5.4.2.1 Situação 1

Para se estudarem as cargas do edifício em estudo começam-se por apresentar os dois gráficos seguintes, onde se pode observar a evolução das cargas de aquecimento para um dia à escolha (31 de Janeiro) de todos os compartimentos e a evolução das cargas de arrefecimento para o dia 29 de Agosto, também de todos os compartimentos (aqui, tal como no estudo das necessidades, apenas se consideram os gabinetes 1, 6 e 9).

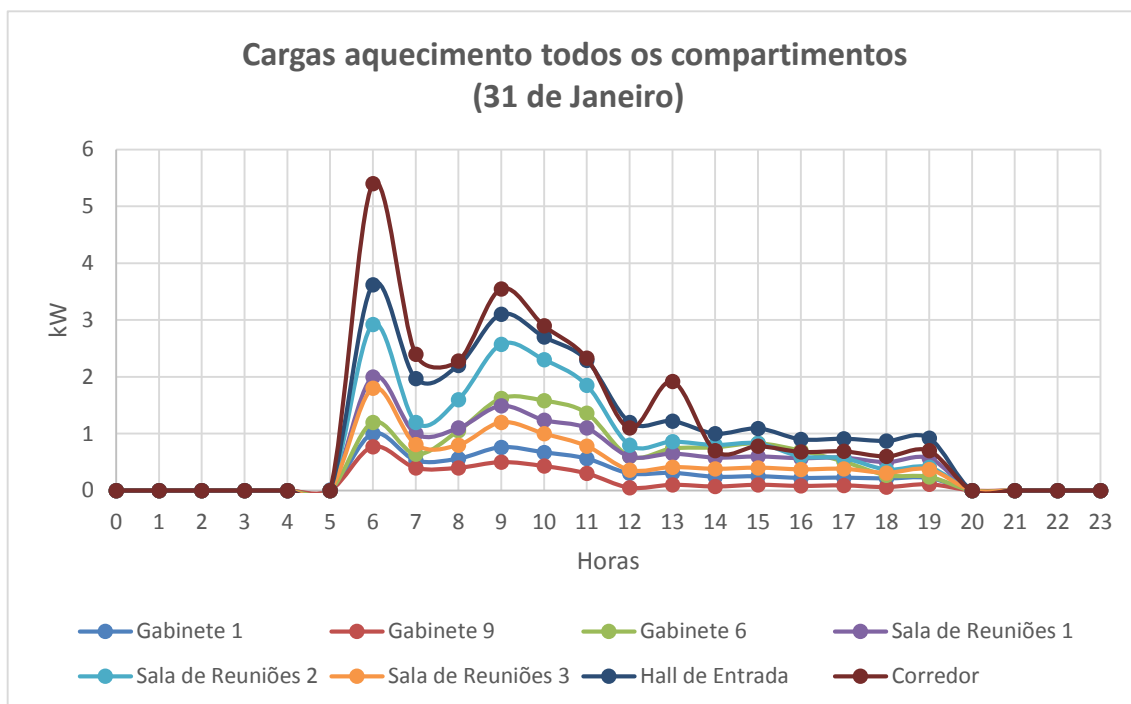


Figura 5.17 - Evolução das cargas térmicas de aquecimento de todos os compartimentos ao longo dia 31 de Janeiro

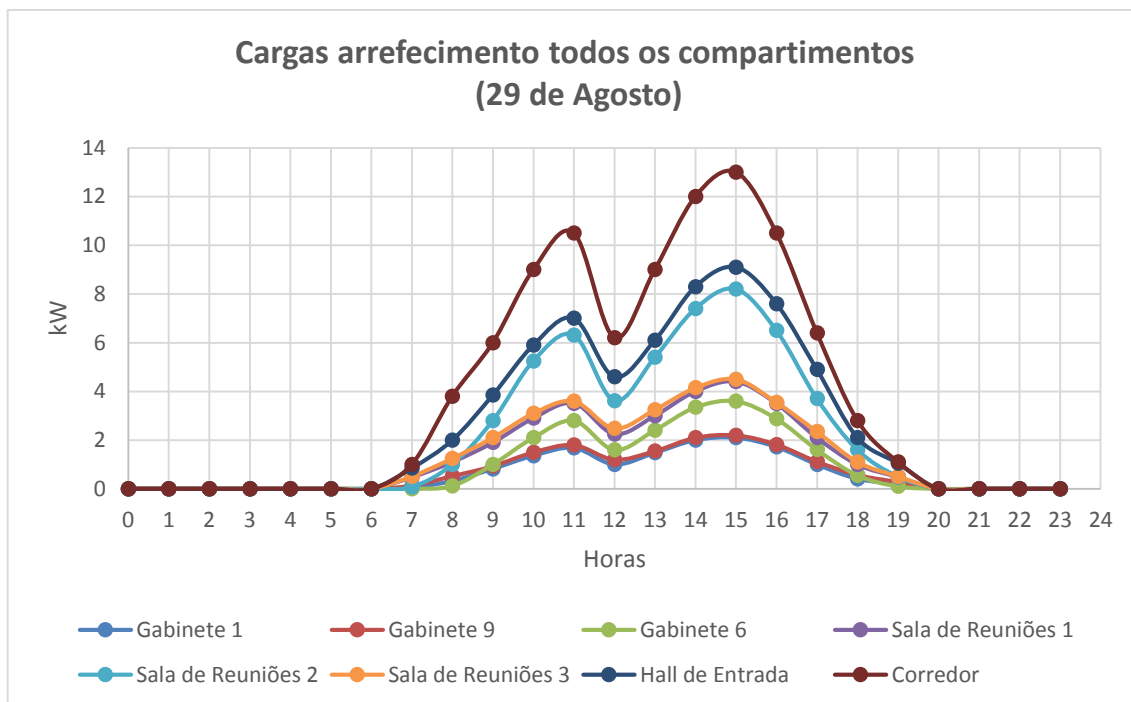


Figura 5.18 - Evolução das cargas térmicas de arrefecimento de todos os compartimentos ao longo dia 29 de Agosto

Da observação dos gráficos, conclui-se que o compartimento denominado Corredor é o que apresenta a maior carga tanto de aquecimento como de arrefecimento. Mais uma vez a possível causa para este resultado é a ventilação, sendo esta a de maior valor entre todos os compartimentos. Basicamente, o Corredor é o espaço que exige o sistema de climatização de aquecimento e de arrefecimento com maior potência.

Repare-se ainda, que em todos os compartimentos a carga máxima ocorre sempre uma hora depois da temperatura exterior ser máxima (14h) e na situação de aquecimento que acontece sempre na hora em que a temperatura é mínima (6 h) no exterior. Basicamente, como já se tinha constatado no subcapítulo 4.2 do presente trabalho, não é perceptível uma sensibilidade do programa relativamente à inércia térmica.

5.4.2.2 Situação 2

Para se perceber a importância da localização dos espaços dentro do próprio edifício, relativamente às cargas térmicas, realizou-se um estudo comparativo entre a evolução dessas cargas para três gabinetes diferentes. Escolheram-se os gabinetes 3, 8 e 11, ou seja, um com orientação Norte, outro situado no “meio” do edifício e um a Sul, respetivamente. O estudo foi realizado para duas situações de aquecimento (18 de Dezembro e 5 de Março) e duas de arrefecimento (4 de Julho e 29 de Agosto), como se pode constatar nos gráficos seguintes.

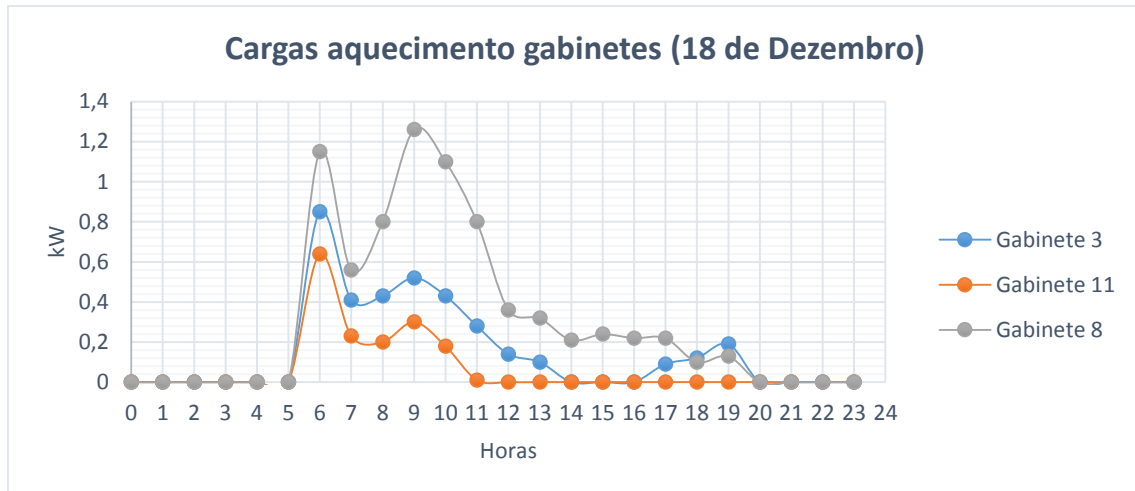


Figura 5.19 - Evolução das cargas térmicas de arrefecimento de três gabinetes ao longo do dia 18 de Dezembro

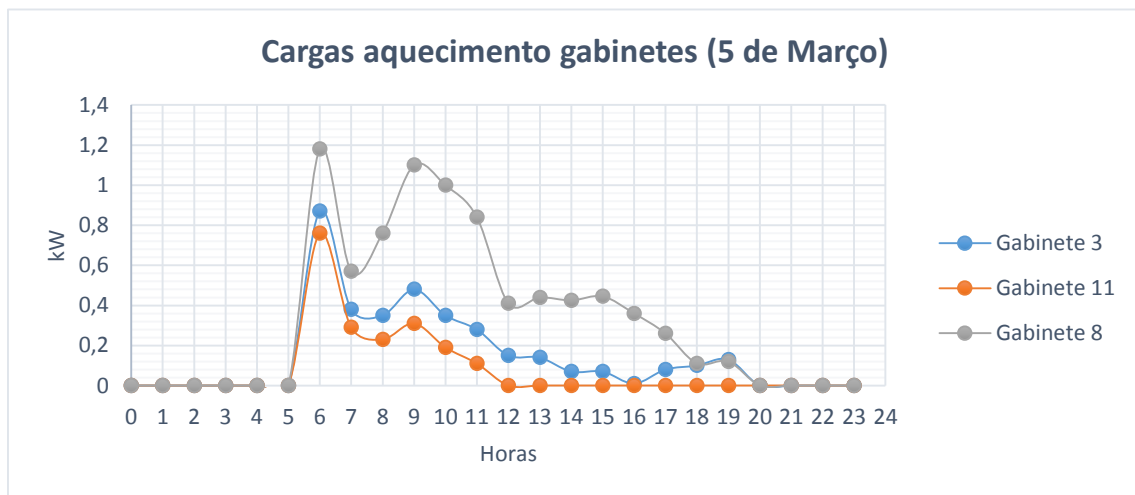


Figura 5.21 - Evolução das cargas térmicas de aquecimento de três gabinetes ao longo do dia 5 de Março

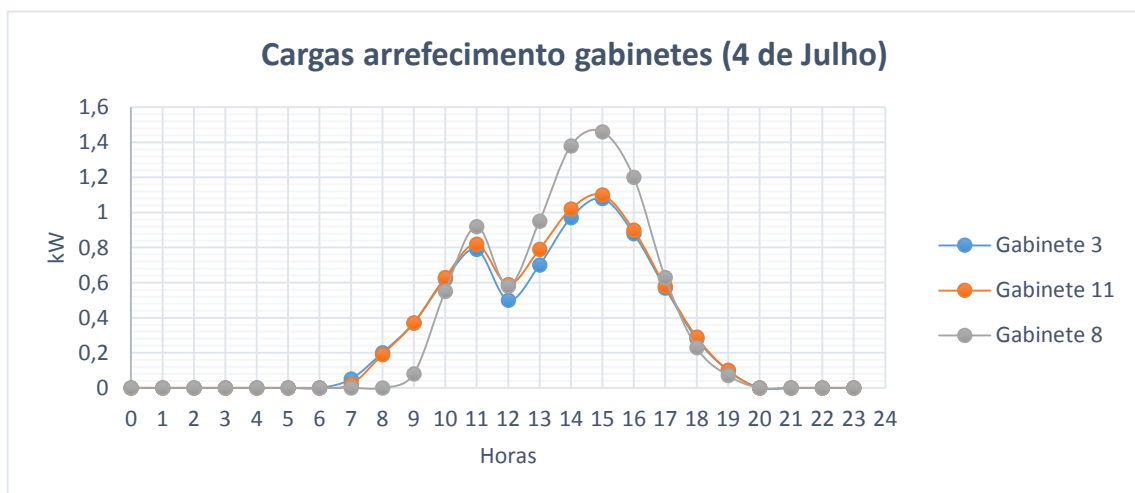


Figura 5.20 - Evolução das cargas térmicas de aquecimento de três gabinetes ao longo do dia 4 de Julho

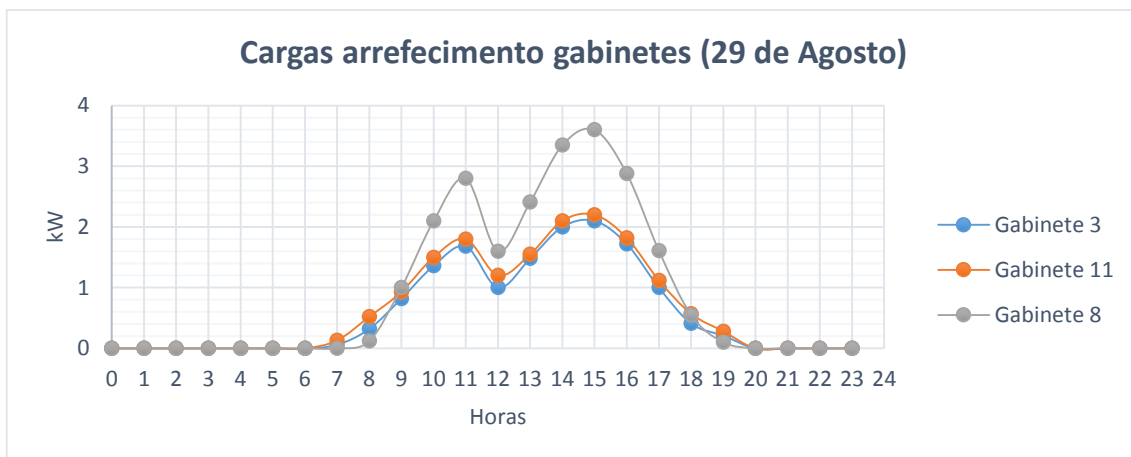


Figura 5.22 - Evolução das cargas térmicas de arrefecimento de três gabinetes ao longo do dia 29 de Agosto

Observando os gráficos, rapidamente se conclui que o gabinete 8 é o que possui mais cargas térmicas, tanto de aquecimento como de arrefecimento. Sendo o compartimento com mais perdas por ventilação, já seria expectável que assim fosse. Sendo um compartimento interior, que não recebe quaisquer ganhos solares durante época de aquecimento também faz com que as cargas durante a estação de aquecimento sejam mais elevadas. Por outro lado, durante o Verão, todo o calor que absorve derivado da sua ocupação, iluminação e cargas internas pouco se perde pelas paredes necessitando de uma maior utilização do sistema de arrefecimento.

Relativamente à comparação entre o gabinete 3 e 11 mais uma vez se verifica a importância dos ganhos através dos vãos envidraçados. Como já constatado ao longo deste trabalho, os envidraçados com orientação Sul são vantajosos em termos energéticos durante a estação mais fria e o oposto na estação de Verão. Com o programa *xEsoView* consegue-se atestar que, efetivamente, o compartimento virado a Sul receberá um maior nível de radiação solar do que o espaço virado a Norte. As figuras 5.23 e 5.24 exibem os resultados obtidos dos ganhos e perdas totais de calor pelos envidraçados, dos gabinetes em estudo, no espaço de um ano.

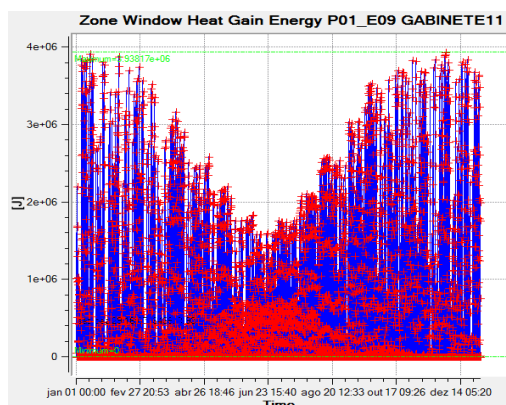


Figura 5.23 - Ganhos de calor pelos vãos envidraçados do Gabinete 11 (Sul)

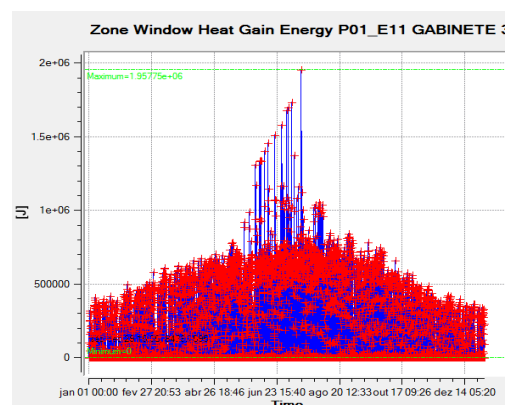


Figura 5.24 - Ganhos de calor pelos vãos envidraçados do Gabinete 3 (Norte)

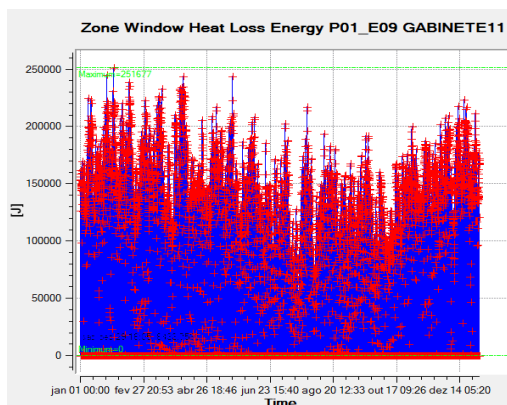


Figura 5.25 - Perdas de calor pelo vão envidraçados do Gabinete 11 (Sul)

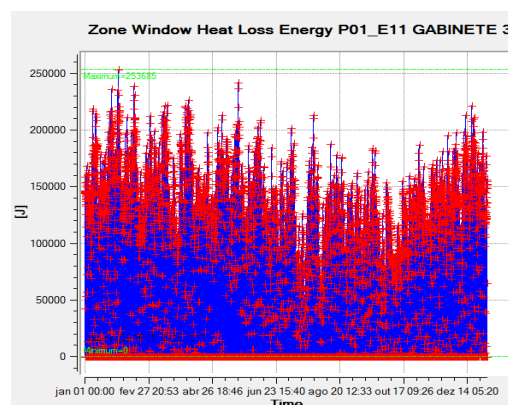


Figura 5.26 - Perdas de calor pelo vão envidraçados do Gabinete 3 (Norte)

Analisando as figuras 5.19 e 5.20 observa-se que a hora onde a carga térmica é máxima difere de um dia para o outro. Para se entender esta situação têm que se analisar os perfis de ocupação, iluminação, equipamentos bem como a temperatura exterior nos respectivos dias. Mais uma vez, com o *xEsoView* obtemos os seguintes gráficos para a evolução da temperatura exterior nesses dias.

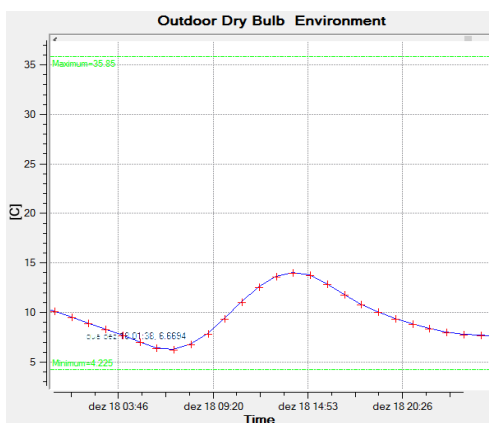


Figura 5.27 - Evolução da temperatura da exterior no dia 18 de Dezembro

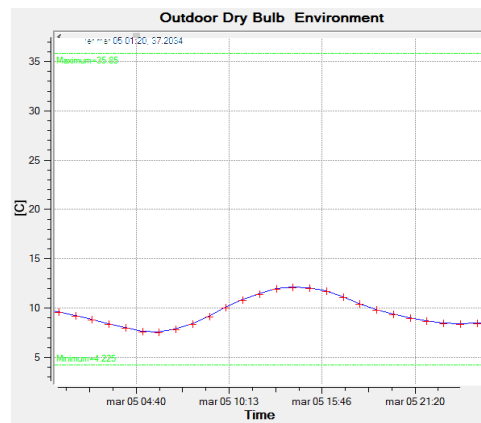


Figura 5.28 - Evolução da temperatura da exterior no dia 5 de Março

Da análise dos gráficos obtêm-se os seguintes dados climáticos:

Tabela 5.8 - Síntese dos dados climáticos dos dias 18 de Dezembro e 5 de Março

	18 de Dezembro	5 de Março
Temperatura Mínima	6,325	7,563
Temperatura Máxima	14,063	12,163
Temperatura Média	9,682	9,629
Temperatura às 9h	7,781	9,094

Com os perfis mencionados, que se encontram nos anexos, e a tabela anterior depreende-se o porquê de no dia 18 de Dezembro a carga máxima passar a ser por volta das 9h. Fundamentalmente, o facto de os parâmetros como ocupação, iluminação, ventilação e equipamentos passarem a estar perto da sua utilização máxima às 9h, faz com que a carga máxima ocorra a essa hora apesar de a temperatura exterior mínima ser às 6h da manhã. Por outras palavras, na figura 5.20, a temperatura exterior que se faz sentir às 9h mais a densidades de ocupação, iluminação, equipamentos e ventilação a essa hora, exigem ao equipamento de aquecimento maior potência do que às 6h onde existe menor densidade de ocupação, etc.

5.4.2.3 Situação 3

Ao analisarem-se as cargas térmicas do edifício em estudo, é possível observar que determinados compartimentos apresentam cargas de aquecimento e arrefecimento no mesmo dia. Examinando as tabelas 5.6 e 5.7, é fácil concluir que os dias onde essa situação pode ocorrer são dias dos meses de Abril e Outubro. Portanto nas figuras seguintes apresentam-se algumas dessas situações encontradas para o dia 22 de Abril para os compartimentos Hall de Entrada e Sala de Reuniões 3.

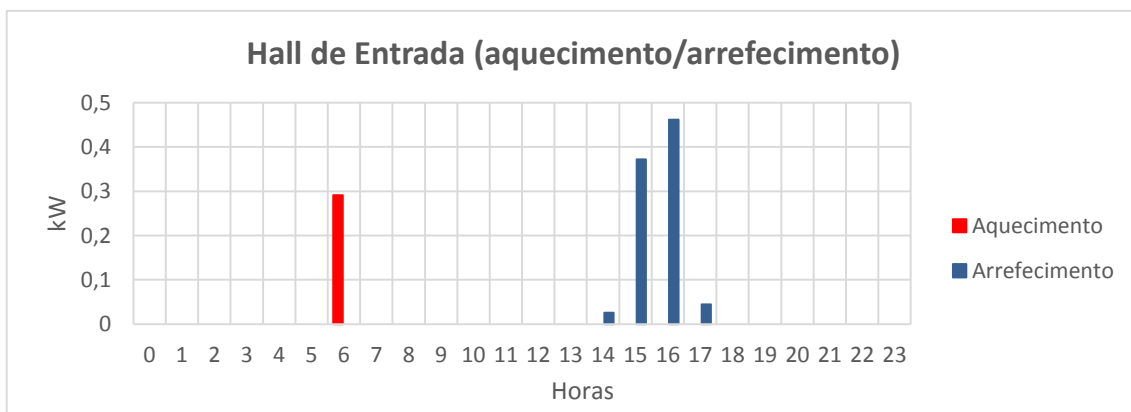


Figura 5.29 - Cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento, no dia 22 de Abril, do Hall de Entrada

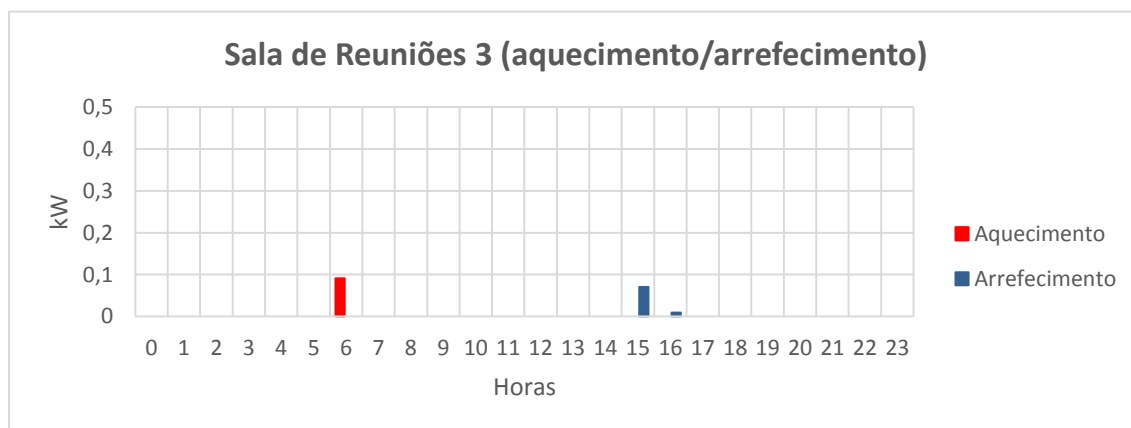


Figura 5.30 - Cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento, no dia 22 de Abril, da Sala de Reuniões 3

Para além da situação visualizada atrás, também pode acontecer que por vezes, existam compartimentos que precisam de aquecimento enquanto outros, ao mesmo tempo, necessitam de arrefecimento. No entanto, neste caso de estudo essa situação não ocorre.

Estas duas situações são importantes para um projetista que tenha que dimensionar um sistema de climatização para um edifício com vários espaços diferentes, demonstrando-se assim, mais uma vez, a utilidade do estudo das cargas térmicas hora a hora numa simulação multizona detalhada.

5.5 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foi realizada uma comparação entre a simulação dinâmica monozona e a simulação dinâmica multizona que permitiu perceber as diferenças entre as mesmas. Posteriormente foram analisados os resultados provenientes da simulação multizona, onde se verificou que é uma ferramenta indispensável para qualquer auditor/projetista que trabalhe na área da climatização. Nesse sentido, a grande conclusão que se pode tirar deste capítulo, é que este tipo de simulação é mais útil e eficaz que a simulação monozona, nomeadamente no dimensionamento do equipamento de climatização de edifícios, e na análise energética de cada espaço.

Ainda foi introduzido neste capítulo, um novo parâmetro energético indispensável para avaliar os edifícios, designado por IEE. Essencialmente este parâmetro traduz o consumo de energia de um edifício por metro quadrado e por ano, permitindo classificar este relativamente à sua eficiência energética. Os dois programas revelaram-se boas opções para determinar este parâmetro, obtendo valores bastante semelhantes para o mesmo.

Relativamente ao *Cypeterm*, mostrou uma vez mais ser uma escolha acertada como interface do *EnergyPlus*. Contudo a nível de *outputs* o programa ainda precisa de algumas melhorias pois para analisar as perdas/ganhos térmicos desagregados tem-se sempre que recorrer a outro programa, como por exemplo o *xEsoView*.

Recomenda-se a leitura do anexo L para mais pormenores acerca dos dois programas utilizados nesta dissertação.

6. Conclusões

O principal objetivo deste estudo prendia-se com a realização de uma simulação dinâmica detalhada de um edifício projetado pelo autor do trabalho, num programa de simulação dinâmica acreditado pela norma ASHRAE 140-2004, o *Cypeterm*, e comparar os resultados obtidos com o programa de simulação simplificada RCCTE-STE do LNEG. Sempre que as opções do programa o permitiram, tentaram-se utilizar os mesmos dados de entrada nos dois programas.

Dessa comparação concluiu-se em primeiro lugar, que ambos os programas são eficazes e suficientes para a verificação do RCCTE bem como para a emissão das respetivas fichas de resultados, apresentando resultados idênticos. Concluiu-se igualmente que o RCCTE-STE é suficiente e relativamente prático como programa quer para o estudo térmico de um edifício do tipo monozona, quer para o cálculo do indicador de eficiência energética. A vantagem de um programa de simulação dinâmica detalhada, como o *Cypeterm/EnergyPlus*, revela-se sobretudo quando existe a necessidade de dimensionar sistemas de climatização diferenciados por zona, e na melhoria do consumo energético do edifício, avaliando as perdas e condições térmicas de cada espaço. O *Cypeterm* mostrou ser um bom interface para o *EnergyPlus*, e bastante rápido e prático no que toca à introdução de dados e consequente construção do modelo do edifício, em comparação com o programa de simulação simplificada.

Dos resultados obtidos pelas diversas simulações realizadas ao longo do trabalho, observaram-se algumas diferenças entre os resultados obtidos pelos dois programas. As principais causas responsáveis por essas diferenças deveram-se sobretudo á ventilação, infiltrações e às diferentes metodologias de cálculo de cada programa. Contudo notou-se uma coerência de valores nos resultados que diziam respeito à parametrização física dos edifícios, como por exemplo nas cargas térmicas devidas à envolvente exterior, envidraçados ou ganhos internos como iluminação, equipamentos e ocupação.

Melhorar o desempenho energético dos edifícios é um fator chave para a sustentabilidade energética. Com a realização deste trabalho pretende-se obter um instrumento útil para a projeto de edifícios com o melhor desempenho energético possível. Nesse sentido, foram realizadas diversas alterações ao edifício em estudo, com auxílio dos programas de simulação já mencionados, que se traduziram nas seguintes conclusões:

- um pé direito elevado traduz-se em necessidades energéticas totais bastante elevadas pois existe um maior volume interior assim como maiores áreas de parede responsáveis por trocas de calor superiores. Portanto na construção de um edifício deve-se optar sempre por um pé direito o mais pequeno possível, tendo em conta a altura das pessoas, condutas do sistema AVAC, entre outros;
- aumentar o valor da inércia térmica, permite poupanças energéticas no edifício, tanto a nível de necessidades como de potências nominais. No entanto, há que ter em conta que uma inércia térmica superior obriga, muitas vezes, a maiores despesas a nível de material construtivo, o que implica realizar um estudo económico acerca do assunto para verificar se realmente compensa o aumento deste fator;
- o aumento da área de envidraçados a Este e Oeste não demonstrou praticamente alterações a nível energético no edifício. Já segundo a orientação Norte, a colocação de vãos envidraçados, não é benéfica do ponto de vista energético. Por fim na orientação oposta, ou seja a Sul, verificou-se precisamente o contrário, pois sendo esta a orientação que recebe maior radiação solar, já seria expectável que isso ocorresse;
- a utilização de vãos envidraçados horizontais, ou claraboias, não se traduz em melhorias energéticas num edifício. A colocação das mesmas permite um aproveitamento maior da iluminação natural. No entanto esse aproveitamento dificilmente supera o aumento verificado a nível de necessidades e potências energéticas;
- os varandins interiores são uma boa opção energética, apenas quando utilizados em edifícios já construídos com um pé direito considerável, caso contrário é preferível construir um edifício com um pé direito inferior e sem a solução referida.

Uma última conclusão deste trabalho é que, todas as opções que um utilizador tomar no uso dos programas de simulação de edifícios vão influenciar o resultado dessas simulações, sendo por isso a experiência do utilizador, independentemente das características de cada programa, determinante para alcançar o pretendido.

Como propostas de trabalho a realizar no futuro, seria interessante dimensionar os sistemas de climatização dos dois edifícios projetados neste estudo. Não foram consideradas AQS nestes edifícios, sendo nesse sentido importante aplicar este sistema aos mesmos, quem sabe recorrendo às Energias Renováveis.

Bibliografia

- [1] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout. *A review on buildings energy consumption information*. Energy and Buildings, 2008.
- [2] Boyano A., Hernandez P., and Wolf O., *Energy demands and potential savings in European office buildings: Case studies based on EnergyPlus simulations*, Energy Build, 2013.
- [3] U. S. Department of Energy – *EnergyPlus Engineering Reference*, 1 de Outubro de 2013.
- [4] Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de Abril – Aprova o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE).
- [5] Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril – Aprova o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE).
- [6] Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril – Aprova o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).
- [7] Susana Camelo, Carlos Pina dos Santos, Álvaro Ramalho, Cristina Horta, Hélder Gonçalves, Eduardo Maldonado. *Manual de apoio à aplicação do RCCTE*. INETI Lisboa 2006.
- [8] ASHRAE, 2009, *Nonresidential Cooling and Heating Load Calculation*. In ASHRAE Handbook - Fundamentals - SI Units. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
- [9] ASHRAE Handbook - Fundamentals - SI Units, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).
- [10] Ramalho (Álvaro F) e Francisco (Jaime M. P.), *Manual do Utilizador RCCTE-STE*, INETI, 2007.
- [11] Top informática. *Cypeterm: Manual do utilizador – Opções*, 2013.
- [12] Carlos dos Santos, Luís Matias. *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios – ITE 50*. LNEC Lisboa 2006.
- [13] Top informática. *Cypeterm: Manual do utilizador – Exemplos práticos*, 2013.
- [14] U. S. Department of Energy – *Auxiliary EnergyPlus Programs*, 22 de Novembro de 2013.
- [15] Canha da Piedade (A.), Moret Rodrigues (A.) e Luís F. Roriz, *Climatização em Edifícios – Envolvente e Comportamento Térmico*. 2ª Edição, Edições ORION.
- [16] Luís F. Roriz, *Climatização - Conceção, instalação e condução de Sistemas*, 2ª Edição, Edições Orion, 2006.
- [17] Moret (A.), Canha da Piedade (A.), Marta Braga (A.), *Térmica dos Edifícios*, Edições Orion, 2009 .
- [18] Crawley, Drurey B.; Hand, Jon W., Kummert, Michael; Griphith, Brent T.; *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*, 2005.

[19] Afonso, João Filipe dos Santos, *Estudo do Comportamento Térmico de Edifícios Antigos – Um Caso de Estudo*, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, 2009.

Links Úteis (última atualização: Setembro de 2014)

<http://www.adene.pt/> - Agência para a Energia

<http://www.topinformatica.pt/> - Página da empresa distribuidora do *Cypeterm*

<https://www.ashrae.org/> - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

<http://xesoview.sourceforge.net/> - página principal do programa *xEsoView*

<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> - página do programa EnergyPlus

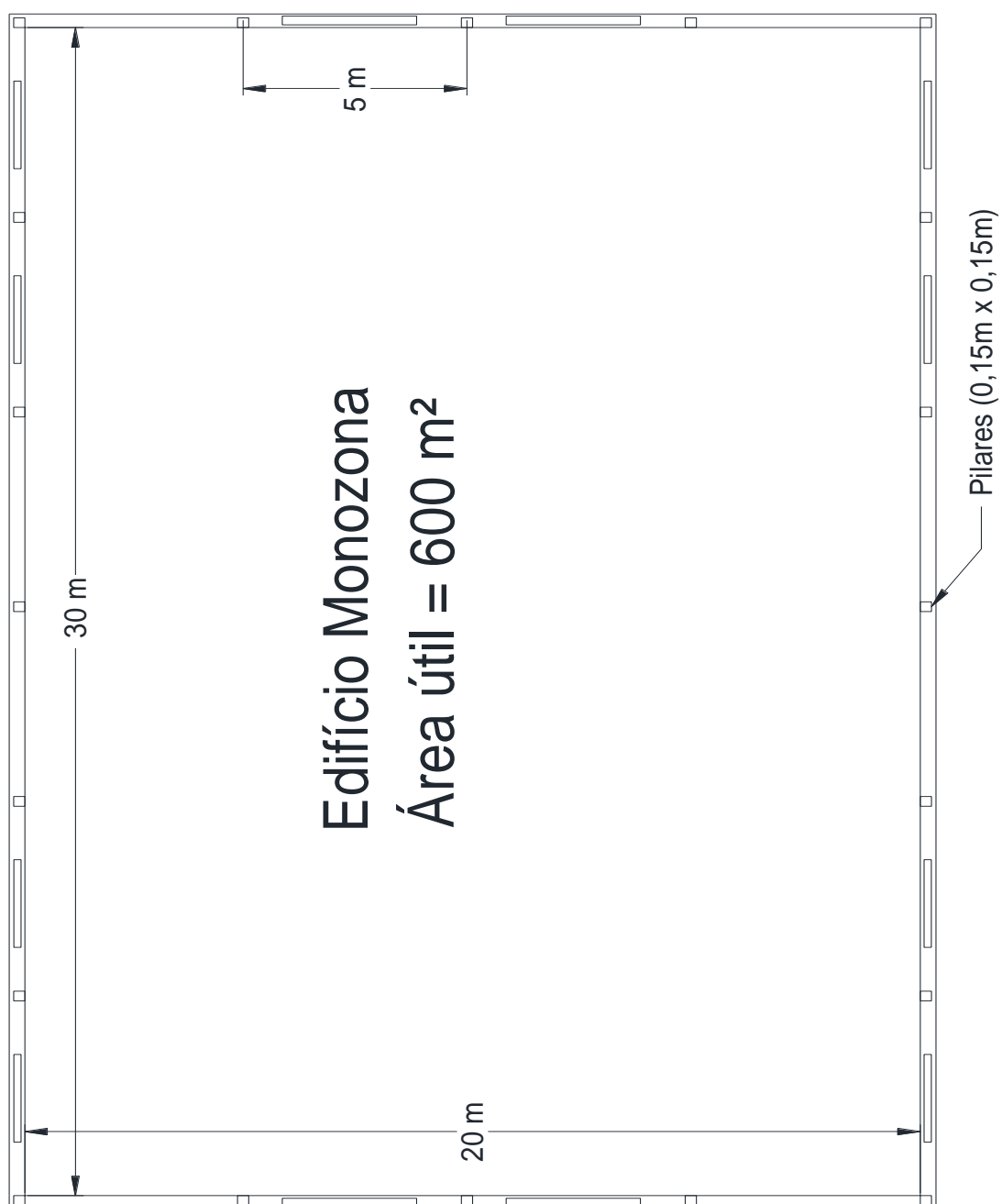
<http://www.dgeg.pt/> - Direção Geral de Energia e Geologia

<http://www.lneg.pt/> - Laboratório Nacional de Energia e Geologia

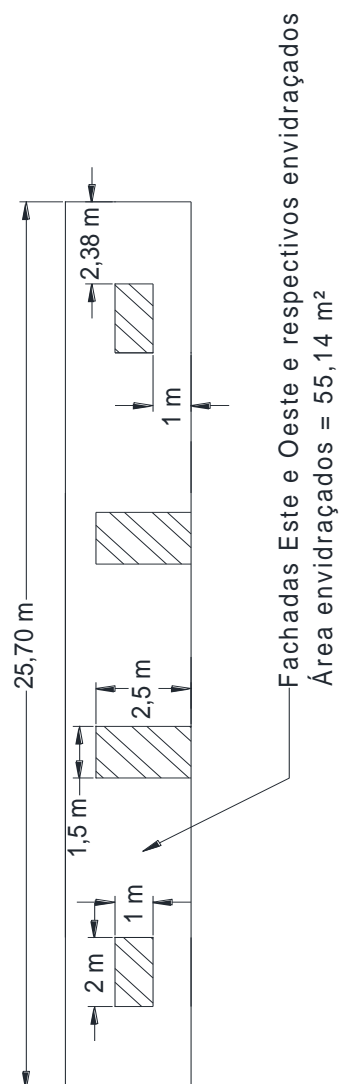
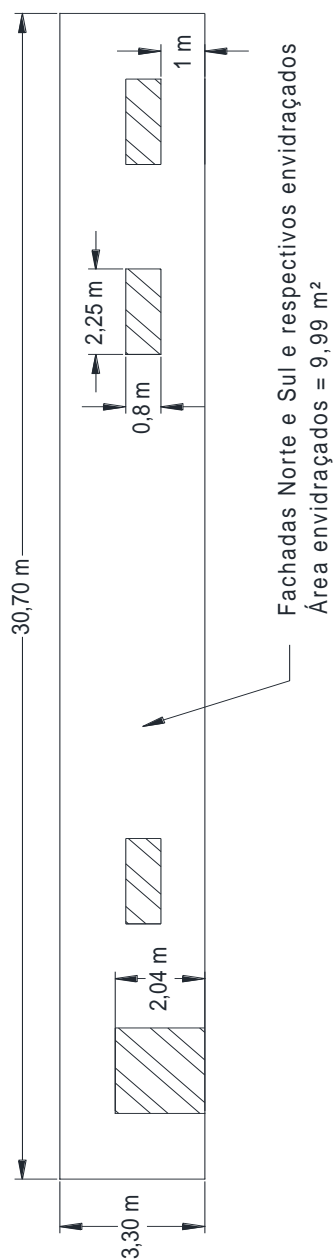
Anexos

Anexo A – Desenhos do edifício monozone

- Planta do edifício monozone: esta planta foi desenhada em *Autodesk AutoCAD* e foi utilizada no *Cypeterm* para introdução dos vários elementos da envolvente do edifício em estudo.



- Fachadas do edifício monozona



Anexo B – Determinação do coeficiente global de transmissão térmica, U, do edifício monozona

- Paredes Exteriores

Elemento constituinte	Espessura (m)	R (m ² .°C/W)	λ (W/m.°C)
R _{si}	-	0,130	-
Reboco	0,015	0,043	0,350
Tijolo cerâmico furado 15	0,150	0,390	-
XPS	0,050	1,350	0,037
Tijolo cerâmico furado 11	0,110	0,270	-
Reboco	0,015	0,043	0,35
R _{se}	-	0,040	-
R _{total} (m ² .°C/W)		2,266	
U (W/m ² .°C)		0,441	

- Pavimento

Elemento constituinte	Espessura (m)	R (m ² .°C/W)	λ (W/m.°C)
Acrílico	0,0075	0,038	0,200
Argamassa	0,04	0,050	0,800
Areia	0,04	0,020	2,000
XPS	0,06	0,541	0,037
Betão	0,15	0,075	2,000
R _{total} (m ² .°C/W)		1,805	
U (W/m ² .°C)		0,554	

- Cobertura

Elemento constituinte	Espessura (m)	R (m ² .°C/W)	λ (W/m.°C)
R _{se}	-	0,040	-
Brita	0,02	0,025	0,8
XPS	0,07	1,892	0,037
Betão	0,20	0,1	2,000
Reboco	0,02	0,057	0,35
R _{si}	-	0,10/0,17	-
R _{total} (m ² .°C/W)		2,214/2,197	
U _{ascendente} (W/m ² .°C)		0,46	
U _{descendente} (W/m ² .°C)		0,45	

- Pontes térmicas planas

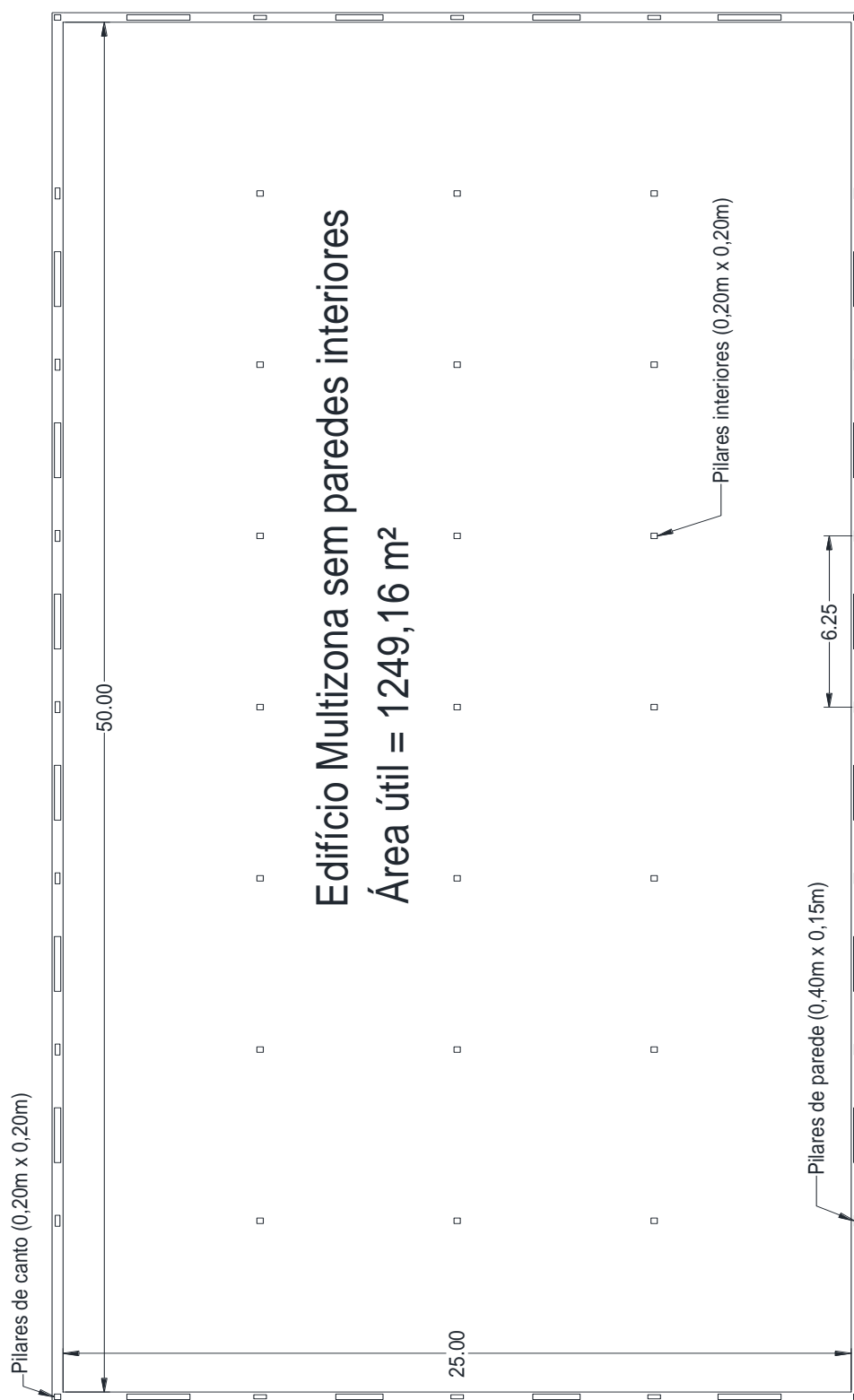
Elemento constituente	Espessura (m)	R (m ² .°C/W)	λ (W/m.°C)
R _{si}	-	0,130	-
Reboco	0,015	0,0115	1,3
Betão	0,150	0,0750	2
XPS	0,050	1,350	0,037
Tijolo cerâmico furado 11	0,110	0,270	-
Reboco	0,015	0,0115	1,3
R _{se}	-	0,040	-
R _{total} (m ² .°C/W)		1,888	
U (W/m ² .°C)		0,529	

Anexo C – Cálculo da inércia térmica do edifício monozona

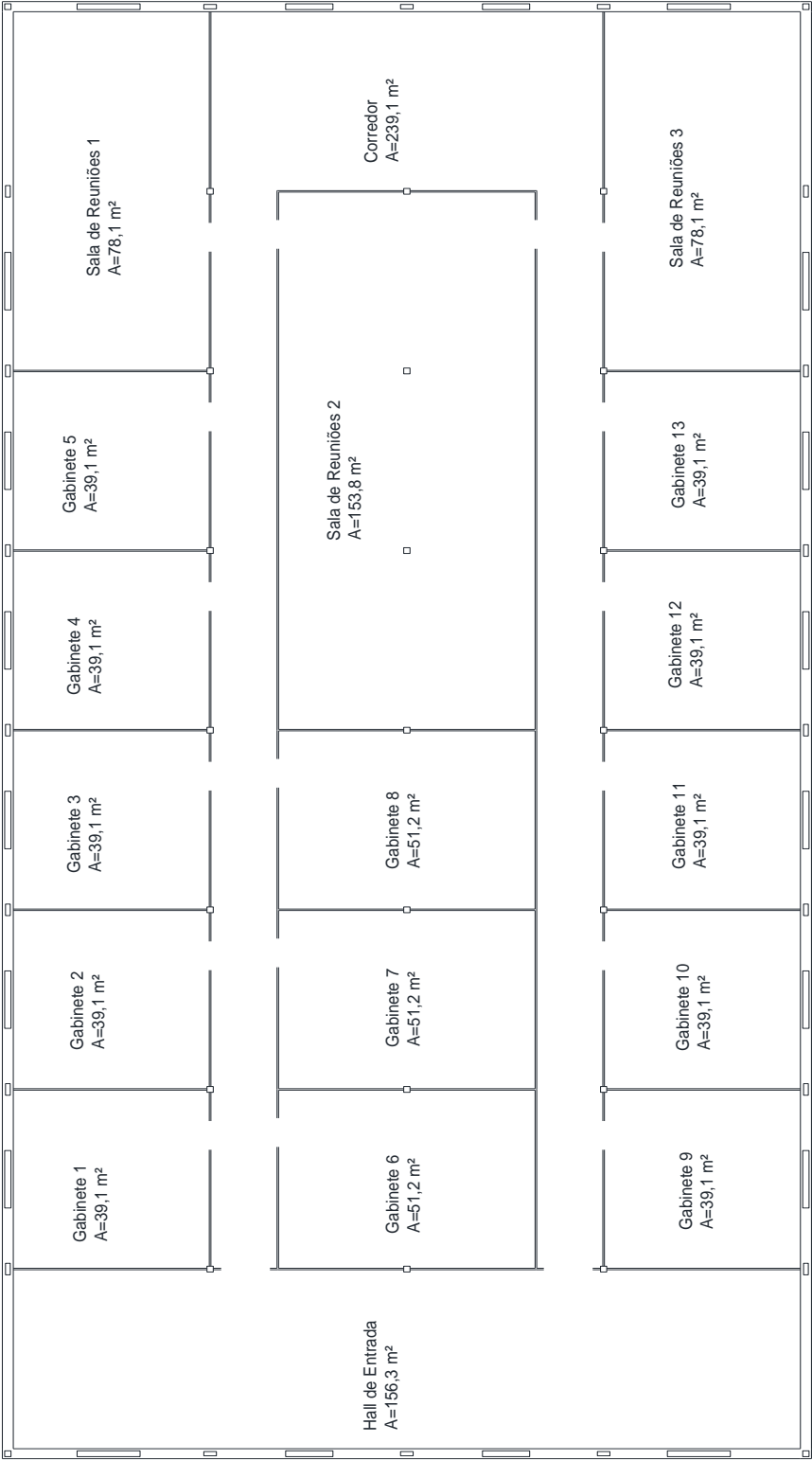
Elementos da construção	M_{si} (kg/m ²)	S_i (m ²)	Fator de correção (r)	$M_{si} \times S_i$ (kg)
Paredes Exteriores	134	256,02	1,00	34243,96
Pavimento	56	600,00	1,00	1800,00
Cobertura	150	600,00	1,00	90000,00
Pontes térmicas planas	150	12,00	1,00	33525,00
Total				159568,96
				/
Área útil de pavimento				600,0
				=
Massa superficial útil por m ² de pavimento				265,95
Classe de inércia				MÉDIA

Anexo D – Desenhos do edifício multizona

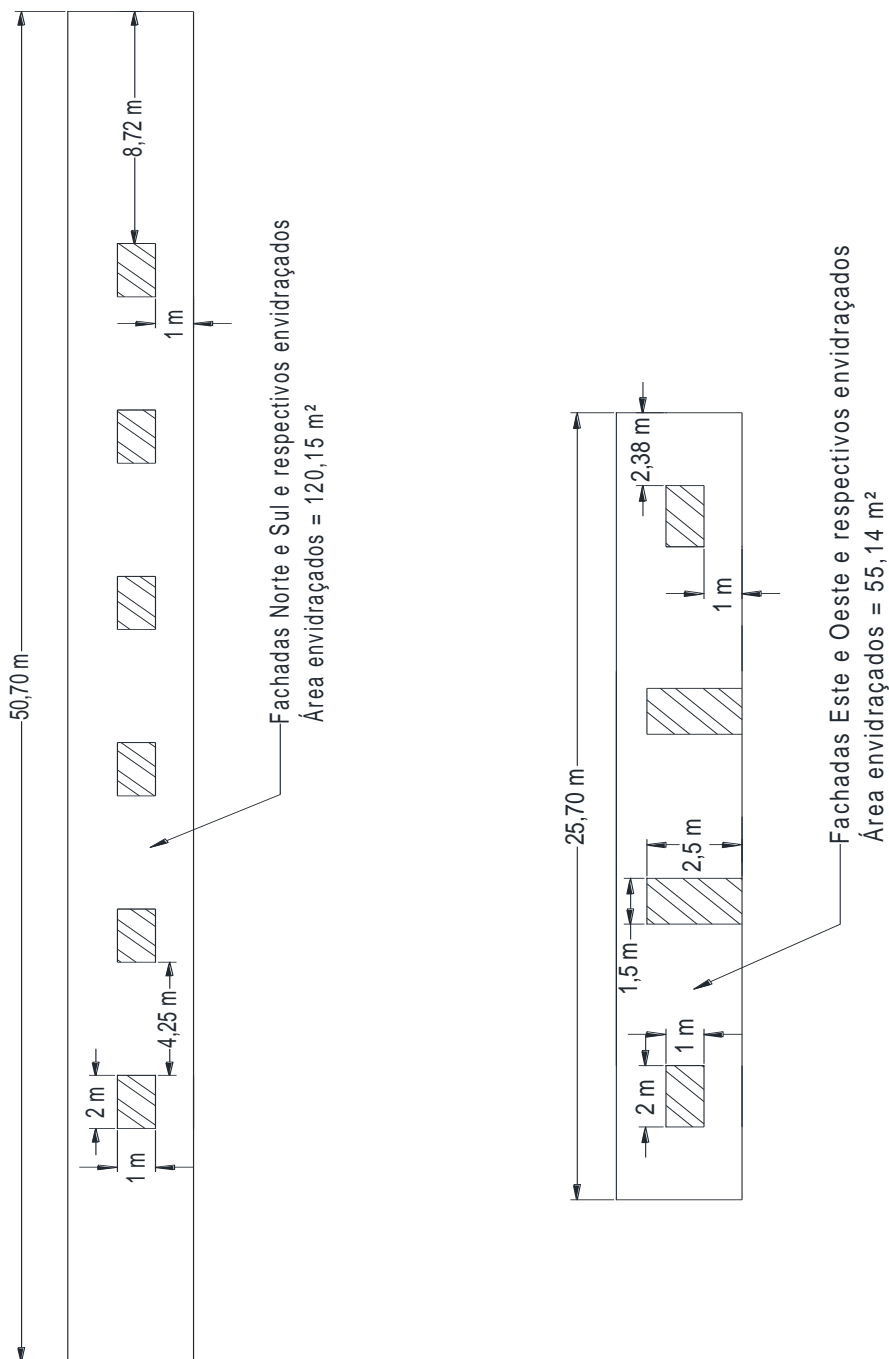
- Planta do edifício multizona ainda sem paredes interiores



- Planta do edifício multizona com paredes interiores



- Fachadas do edifício multizona



Anexo E – Cálculo da inércia térmica do edifício multizona

- Inércia térmica do edifício multizona ainda sem paredes interiores

Elementos da construção	M _{si} (kg/m ²)	S _i (m ²)	Fator de correção (r)	M _{si} × S _i (kg)
Paredes Exteriores	150	378,97	1,00	56845,87
Pavimento	89	1249,16	1,00	110569,40
Cobertura	150	1249,16	1,00	187374,00
Pontes térmicas planas	150	21,90	1,00	3284,65
Pilares Interiores	50	6,46	0,50	161,43
Total				358388,90
				/
Área útil de pavimento				1249,16
				=
Massa superficial útil por m ² de pavimento				286,90
Classe de inércia				MÉDIA

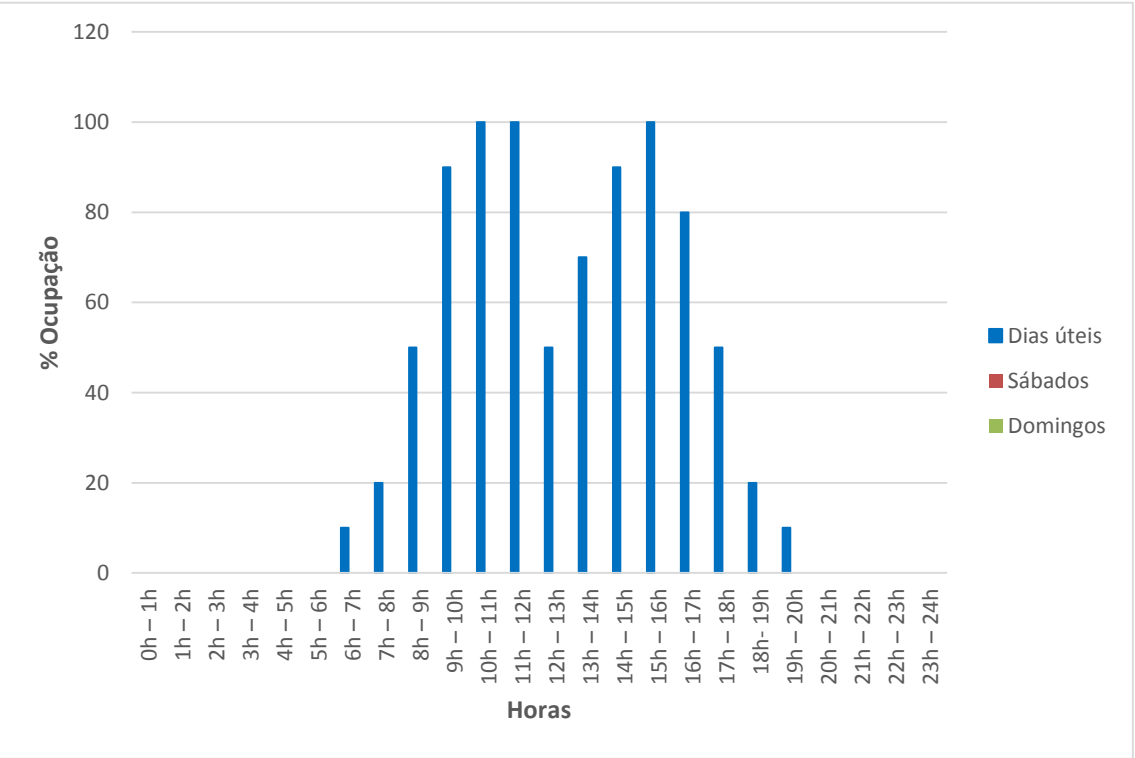
- Inércia térmica do edifício multizona com paredes interiores

Elementos da construção	M_{si} (kg/m ²)	S_i (m ²)	Fator de correção (r)	$M_{si} \times S_i$ (kg)
Paredes Exteriores	150	378,97	1,00	56845,87
Pavimento	89	1235,44	1,00	109355,27
Cobertura	150	1235,44	1,00	185316,51
Pontes térmicas planas	150	21,90	1,00	3284,65
Paredes Interiores	50	839,04	0,50	20976,10
Pilares Interiores	50	6,46	0,50	161,43
Total				375939,83
				/
Área útil de pavimento				1235,4
				=
Massa superficial útil por m ² de pavimento				304,30
Classe de inércia				MÉDIA

Anexo F – Perfis de utilização

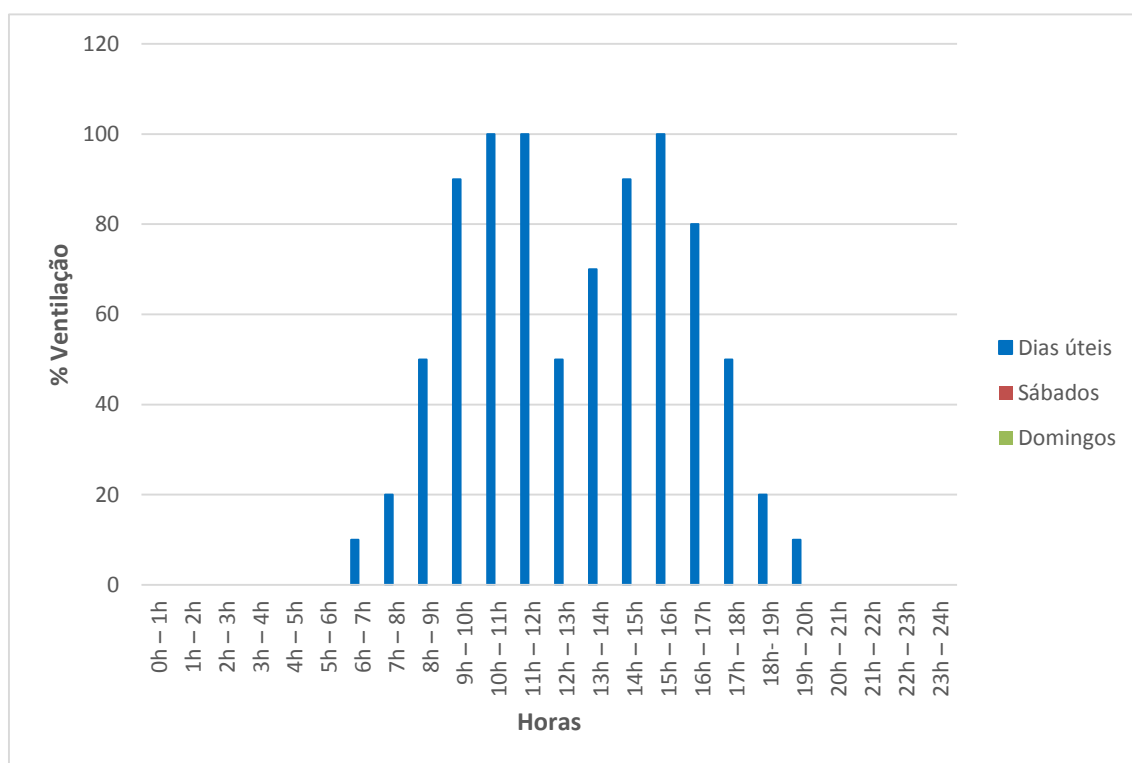
- Ocupação

Horas	Dias Úteis	Sábados	Domingos	Horas	Dias Úteis	Sábados	Domingos
0h – 1h	0	0	0	12h – 13h	50	0	0
1h – 2h	0	0	0	13h – 14h	70	0	0
2h – 3h	0	0	0	14h – 15h	90	0	0
3h – 4h	0	0	0	15h – 16h	100	0	0
4h – 5h	0	0	0	16h – 17h	80	0	0
5h – 6h	0	0	0	17h – 18h	50	0	0
6h – 7h	10	0	0	18h- 19h	20	0	0
7h – 8h	20	0	0	19h – 20h	10	0	0
8h – 9h	50	0	0	20h – 21h	0	0	0
9h – 10h	90	0	0	21h – 22h	0	0	0
10h – 11h	100	0	0	22h – 23h	0	0	0
11h – 12h	100	0	0	23h – 24h	0	0	0



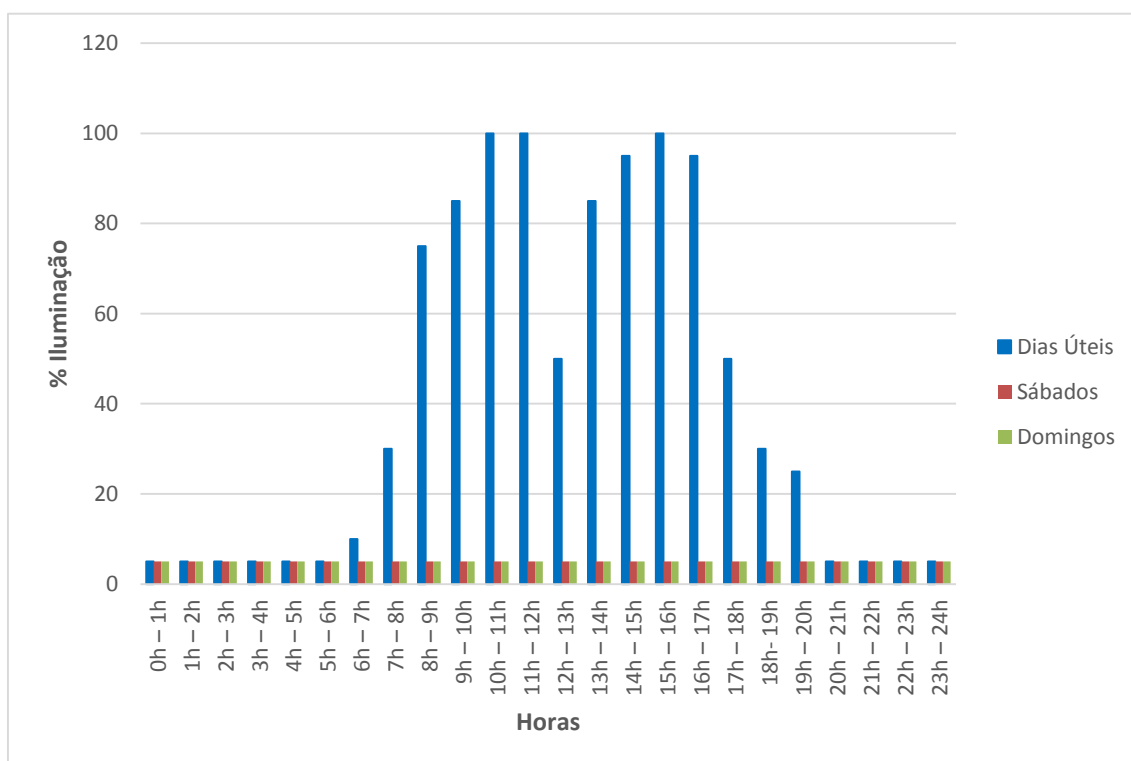
- Ventilação

Horas	Dias Úteis	Sábados	Domingos	Horas	Dias Úteis	Sábados	Domingos
0h – 1h	0	0	0	12h – 13h	50	0	0
1h – 2h	0	0	0	13h – 14h	70	0	0
2h – 3h	0	0	0	14h – 15h	90	0	0
3h – 4h	0	0	0	15h – 16h	100	0	0
4h – 5h	0	0	0	16h – 17h	80	0	0
5h – 6h	0	0	0	17h – 18h	50	0	0
6h – 7h	10	0	0	18h- 19h	20	0	0
7h – 8h	20	0	0	19h – 20h	10	0	0
8h – 9h	50	0	0	20h – 21h	0	0	0
9h – 10h	90	0	0	21h – 22h	0	0	0
10h – 11h	100	0	0	22h – 23h	0	0	0
11h – 12h	100	0	0	23h – 24h	0	0	0



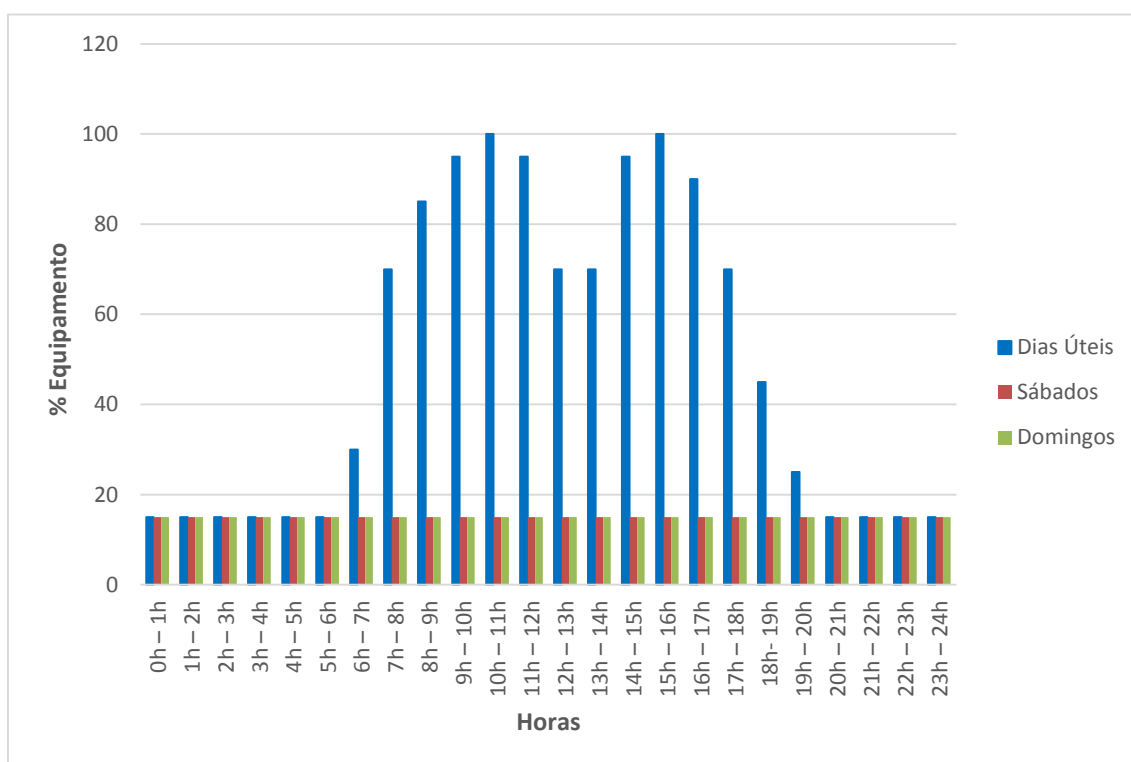
- Iluminação

Horas	Dias Úteis	Sábados	Domingos	Horas	Dias Úteis	Sábados	Domingos
0h – 1h	5	5	5	12h – 13h	50	5	5
1h – 2h	5	5	5	13h – 14h	85	5	5
2h – 3h	5	5	5	14h – 15h	95	5	5
3h – 4h	5	5	5	15h – 16h	100	5	5
4h – 5h	5	5	5	16h – 17h	95	5	5
5h – 6h	5	5	5	17h – 18h	50	5	5
6h – 7h	10	5	5	18h- 19h	30	5	5
7h – 8h	30	5	5	19h – 20h	25	5	5
8h – 9h	75	5	5	20h – 21h	5	5	5
9h – 10h	85	5	5	21h – 22h	5	5	5
10h – 11h	100	5	5	22h – 23h	5	5	5
11h – 12h	100	5	5	23h – 24h	5	5	5



- Equipamento

Horas	Dias Úteis	Sábados	Domingos	Horas	Dias Úteis	Sábados	Domingos
0h – 1h	15	15	15	12h – 13h	70	15	15
1h – 2h	15	15	15	13h – 14h	70	15	15
2h – 3h	15	15	15	14h – 15h	95	15	15
3h – 4h	15	15	15	15h – 16h	100	15	15
4h – 5h	15	15	15	16h – 17h	90	15	15
5h – 6h	15	15	15	17h – 18h	70	15	15
6h – 7h	30	15	15	18h- 19h	45	15	15
7h – 8h	70	15	15	19h – 20h	25	15	15
8h – 9h	85	15	15	20h – 21h	15	15	15
9h – 10h	95	15	15	21h – 22h	15	15	15
10h – 11h	100	15	15	22h – 23h	15	15	15
11h – 12h	95	15	15	23h – 24h	15	15	15



Anexo G – Fatores solares dos vãos envidraçados considerados no *Cypeterm* e RCCTE-STE segundo cada orientação

Orientação do vão envidraçado	Xj	Fg	Fs Inv.	Fs Ver.	Fw Inv.	Fw Ver.
Norte	0,27	0,5	0,9	0,9	0,9	0,8
Sul	1	0,5	0,9	0,9	0,9	0,75
Este	0,56	0,5	0,9	0,9	0,9	0,85
Oeste	0,56	0,5	0,9	0,9	0,9	0,85

Anexo H – Resultados das simulações do caso de estudo monozona (capítulo 3)

Tendo em conta o elevado número de simulações realizadas durante este trabalho, o número de folhas de resultados apresentado pelos dois programas seria enorme. Nesse sentido, optou-se por apresentar de seguida, apenas algumas imagens mais relevantes desses resultados.

- **Resultados do programa RCCTE-STE**

Resultados da verificação do regulamento RCCTE

Mapa de Valores Nominais para o Edifício											
Zona Climática:	I1	V2	Altitude (m):		40						
Graus Dia (°C):	1190,00		Duração Aquec. (meses):	5,30		Temp. de Verão (°C):		23			
Fracção Autónoma	Ap (m²)	Taxa Ren. (RPH)	Nic (kWh / m².ano)	Ni (kWh / m².ano)	Nvc (kWh / m².ano)	Nlv (kWh / m².ano)	Nac (kWh / m².ano)	Nla (kWh / m².ano)	Ntc (kgep / m².ano)	Nlt (kgep / m².ano)	
fracc_base	600,00	0,60	24,71	51,51	22,47	32,00	0,00	0,00	0,40	0,75	

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios

Folha Cálculo FCIV.2

Cálculo do Indicador Nic

Perdas térmicas associadas a:	(W/°C)
Envolvente Exterior (da FCIV.1a)	637,61
	+
Envolvente Interior (da FCIV.1b)	0,00
	+
Vãos Envidraçados (da FCIV.1c)	86,37
	+
Renovação de Ar (da FCIV.1d)	367,20
	=
Coefficiente Global de Perdas (W/°C)	1091,18
	X
Graus-Dia no Local (°C.dia)	1190,00
	X
	0,024
	+
Consumo dos ventiladores	0,00
	=
Necessidades Brutas de Aquecimento (kWh/ano)	31164,10
	-
Ganhos Totais Úteis (da FCIV.1e)	16338,98
	=
Necessidades de Aquecimento (kWh/ano)	14825,12
	/
Área Útil de pavimento (m²)	600,00
	=
Necessidades Nominais de Aquecimento - Nic (kWh/m².ano)	24,71
	<=
Necessidades Nominais de Aquecimento Máximas - Ni (kWh/m².ano)	51,51

Resultados da simulação dinâmica

RESULTADOS ► síntese do Edifício

O edifício encontra-se regulamentar

	Necessidades nominais de energia* [kWh/m ² .ano]		80%	Necessidades de energia máximas [kWh/m ² .ano]
	fracc_base			
Aquecimento	24,71	<	41,21	51,51
Arrefecimento	22,47	<	25,60	32,00

	IEE [kgep/m ² .ano]	valor de referência limite [kgep/m ² .ano]
tipologia serv_b	23,0	35,0
Total	23,0	35,0

	Potência a instalar [kW]		Potência máxima a instalar [kW]	Potência nominal de simulação [kW]	Justificações (se necessário)
			climaa		
Aquecimento	30,00	<=	31,78	22,70	
Arrefecimento	30,00	<=	45,93	32,81	

- Resultados do programa Cypeterm/EnergyPlus**

Resultados da verificação do regulamento RCCTE

Mapa de valores nominais para o edifício

Zona climática I1 V2	Altitude 40 m
Graus-dias 1190 °C.dia	Duração Aquec. 5.3 meses
	Temp. de verão 23 °C

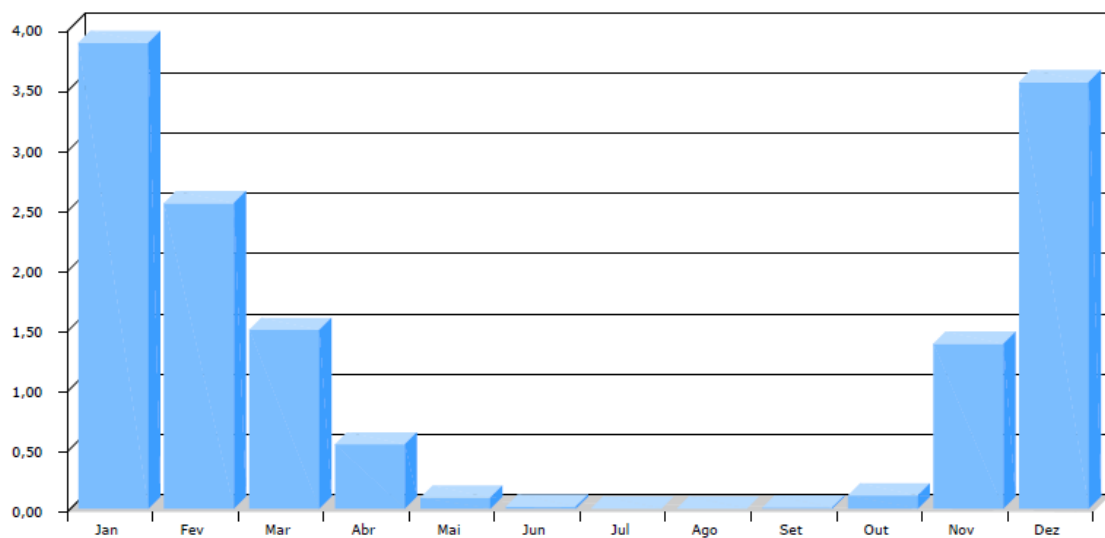
Fracção autónoma	Ap (m ²)	Taxa ren. (RPH)	Nic (kWh/m ² .ano)	Ni (kWh/m ² .ano)	Nvc (kWh/m ² .ano)	Nv (kWh/m ² .ano)	Nac (kWh/m ² .ano)	Na (kWh/m ² .ano)	Ntc (kgep/m ² .ano)	Nt (kgep/m ² .ano)
fraccao_edificio base	600.00	0.60	23.79	51.51	21.94	32.00	0.00	0.00	0.38	0.75

Perdas térmicas associadas a:	(W/°C)
Envolvente exterior	647.81
Envolvente interior	0.00
Vãos envidraçados	86.34
Renovação de ar	367.20

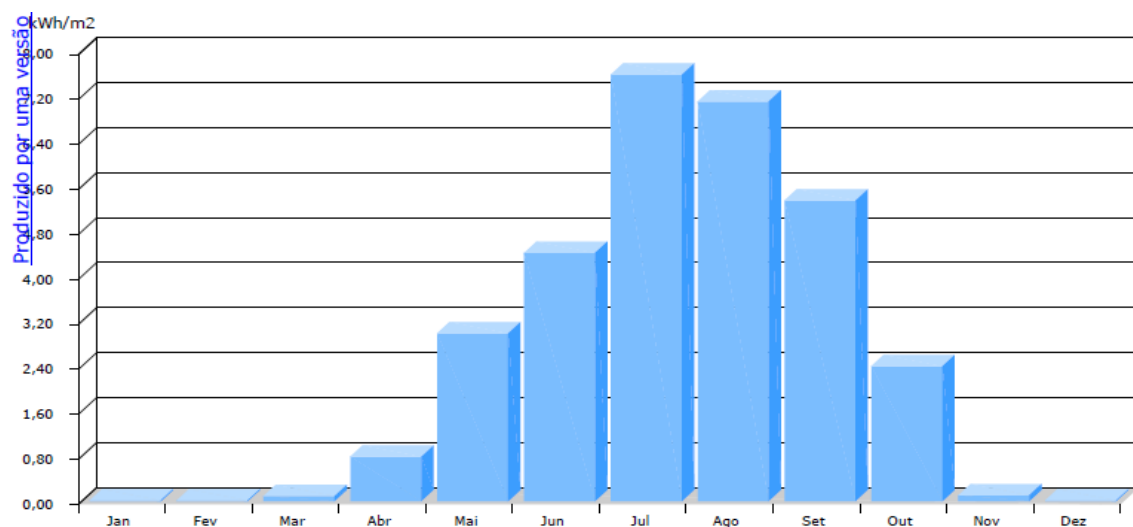
	=	
Coefficiente global de perdas (W/°C)		1101.35
	x	
Graus-dias (°C.dia)		1190
	x	
		0.024
	=	
Necessidades brutas de aquecimento (kWh/ano)		31454.56
	+	
Consumo de electricidade para os ventiladores (kWh/ano)		0.00
	-	
Ganhos totais úteis (kWh/ano)		17180.01
	=	
Necessidades de aquecimento (kWh/ano)		14274.55
	/	
Área útil de pavimento (m²)		600.00
	=	
Nec. nominais de aquecimento - Nic (kWh/m².ano)		24
	≤	
Nec. nom. de aquecimento máximas - Ni (kWh/m².ano)		52

Resultados da simulação dinâmica

Compartimento	Superfícies (m²)	Meses (kWh/m²)												Total (kWh/m²)
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
P01_E01 Edifício Monozona	600.00	3.88	2.54	1.49	0.53	0.09	0.02	-	-	0.01	0.11	1.37	3.55	13.58
Total	600.00	3.88	2.54	1.49	0.53	0.09	0.02	-	-	0.01	0.11	1.37	3.55	13.58



Compartimento	Superfícies (m²)	Meses (kWh/m²)												Total (kWh/m²)
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
P01_E01 Edifício Monozona	600.00	0.01	0.01	0.09	0.79	2.98	4.41	7.59	7.11	5.35	2.40	0.10	0.01	30.84
Total	600.00	0.01	0.01	0.09	0.79	2.98	4.41	7.59	7.11	5.35	2.40	0.10	0.01	30.84

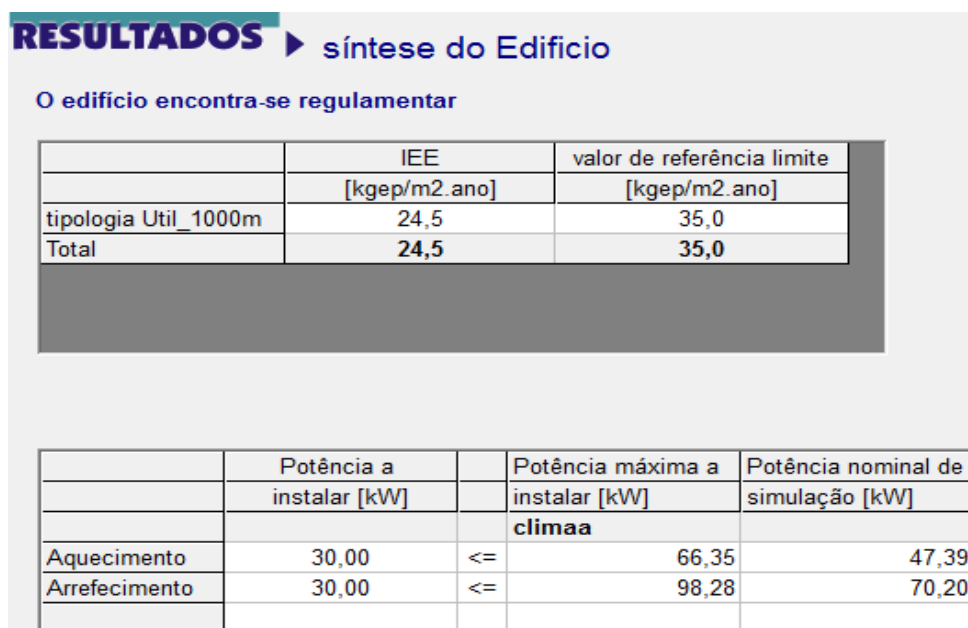


Note-se que foi utilizada uma versão educativa do programa *Cypeterm*. Por isso mesmo, todas as folhas de resultados obtidas ficam com as letras azuis que se podem observar na imagem anterior.

Anexo I – Resultados das simulações do caso de estudo multizona (capítulo 5)

- Resultados do programa RCCTE-STE**

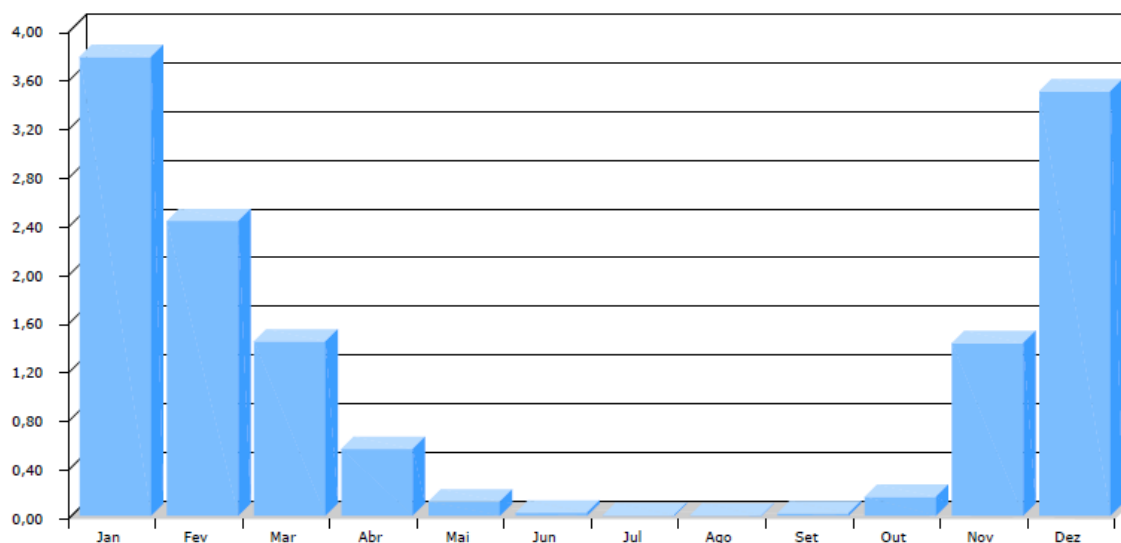
Resultados da simulação dinâmica



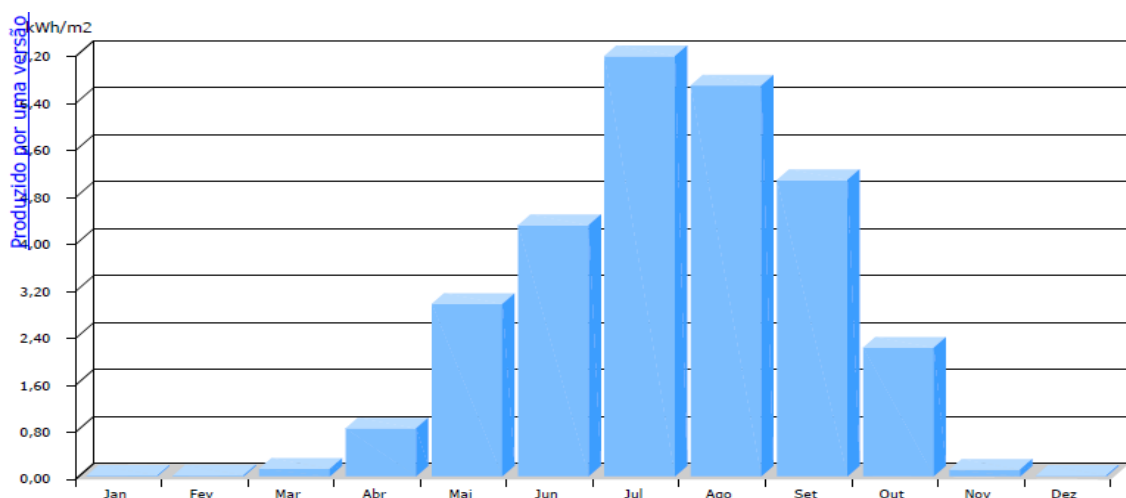
- Resultados do programa Cypeterm/EnergyPlus**

Resultados da simulação dinâmica (simulação do edifício multizona ainda sem paredes interiores e os respectivos espaços)

Compartimento	Superfícies (m²)	Meses (kWh/m²)												Total (kWh/m²)
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
P01_E01 Escritorios	1250.00	3.77	2.42	1.43	0.55	0.12	0.02	0.00	-	0.02	0.15	1.42	3.49	13.39
Total	1250.00	3.77	2.42	1.43	0.55	0.12	0.02	0.00	-	0.02	0.15	1.42	3.49	13.39



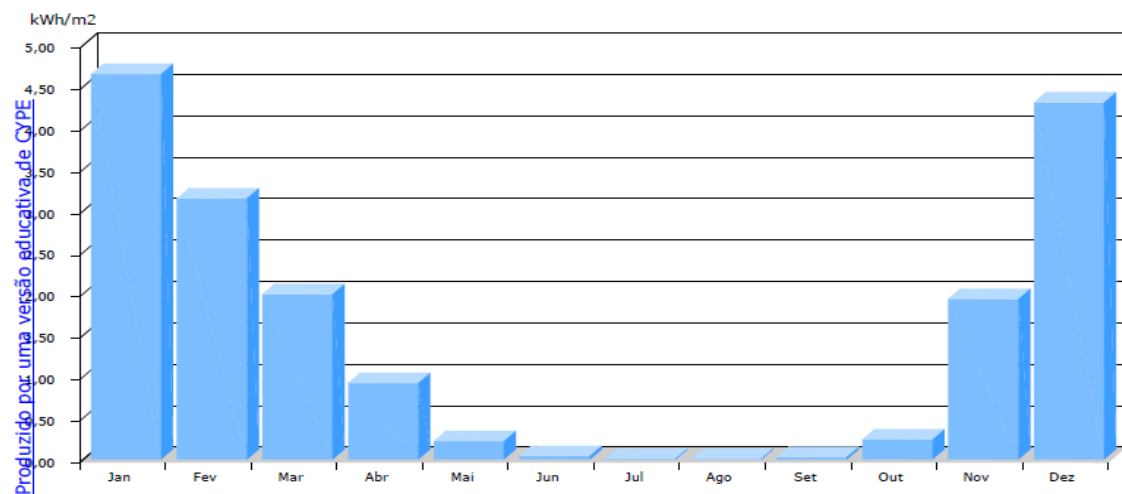
Compartimento	Superfícies (m²)	Meses (kWh/m²)												Total (kWh/m²)
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
P01_E01 Escritorios	1250.00	0.01	0.01	0.13	0.82	2.94	4.28	7.16	6.65	5.05	2.19	0.11	0.01	29.35
Total	1250.00	0.01	0.01	0.13	0.82	2.94	4.28	7.16	6.65	5.05	2.19	0.11	0.01	29.35



Resultados da simulação dinâmica (simulação do edifício multizona já com todos os espaços definidos)

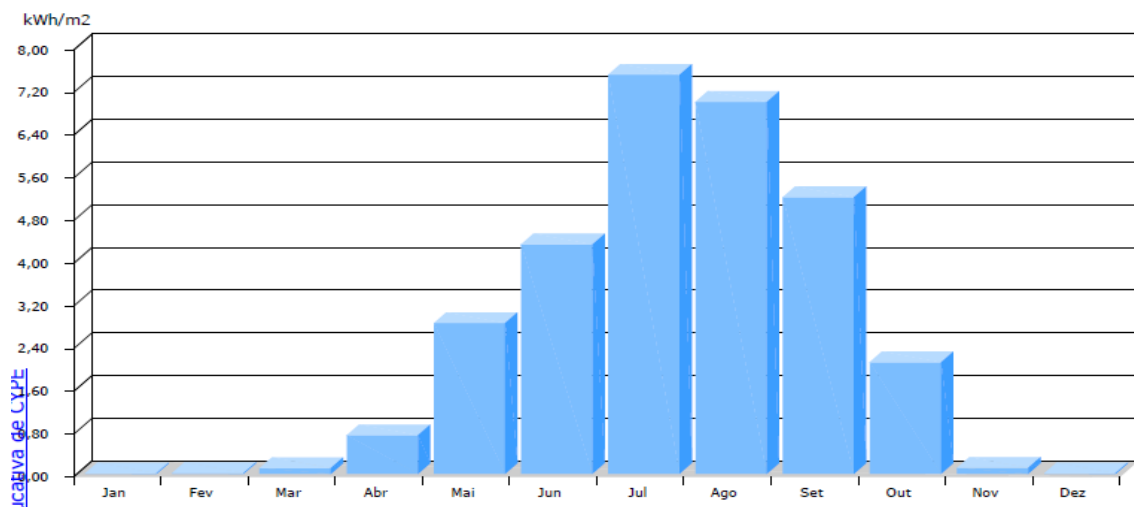
Compartimento	Superfícies (m²)	Meses (kWh/m²)												Total (kWh/m²)
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
P01_E01 Hall de Entrada	156.25	4.99	3.35	1.94	0.74	0.14	0.03	0.00	-	0.02	0.19	1.94	4.57	17.90
P01_E02 Gabinete 9	39.07	3.23	2.09	1.43	0.59	0.18	0.04	0.00	0.00	0.01	0.11	1.14	2.74	11.57
P01_E03 Corredor	239.28	3.77	2.37	1.40	0.52	0.11	0.02	-	-	0.02	0.18	1.54	3.55	13.46
P01_E04 Gabinete 6	51.25	7.52	5.47	3.79	2.19	0.60	0.11	0.04	0.03	0.07	0.55	3.53	7.10	31.00

Compartimento	Superfícies (m²)	Meses (kWh/m²)												Total (kWh/m²)
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
P01_E05 Gabinete 1	39.06	5.20	3.62	2.26	1.08	0.22	0.03	0.00	0.00	0.03	0.29	2.26	4.91	19.90
P01_E06 Gabinete10	39.08	3.17	2.04	1.40	0.59	0.19	0.04	0.00	0.00	0.01	0.11	1.11	2.67	11.33
P01_E07 Gabinete 7	51.25	7.51	5.47	3.82	2.25	0.63	0.12	0.04	0.03	0.08	0.57	3.55	7.10	31.16
P01_E08 Gabinete 2	39.06	5.21	3.64	2.28	1.12	0.23	0.03	0.00	0.00	0.03	0.30	2.29	4.93	20.08
P01_E09 Gabinete11	39.08	3.17	2.04	1.40	0.59	0.19	0.04	0.00	0.00	0.01	0.11	1.11	2.67	11.33
P01_E10 Gabinete 8	51.24	7.50	5.46	3.81	2.23	0.62	0.12	0.04	0.03	0.08	0.56	3.53	7.09	31.07
P01_E11 Gabinete 3	39.06	5.20	3.63	2.27	1.11	0.23	0.03	0.00	0.00	0.03	0.30	2.28	4.91	20.00
P01_E12 Gabinete12	39.08	3.17	2.04	1.40	0.59	0.19	0.04	0.00	0.00	0.01	0.11	1.11	2.67	11.33
P01_E13 Sala de Reuniões 2	153.75	3.98	2.75	1.69	0.84	0.22	0.06	0.02	0.01	0.04	0.23	1.65	3.76	15.25
P01_E14 Gabinete 4	39.07	5.19	3.62	2.27	1.11	0.23	0.03	0.00	0.00	0.03	0.30	2.28	4.91	20.00
P01_E15 Gabinete13	39.08	3.20	2.06	1.41	0.59	0.18	0.04	0.00	0.00	0.01	0.11	1.12	2.70	11.44
P01_E16 Gabinete 5	39.07	5.21	3.63	2.27	1.10	0.23	0.03	0.00	0.00	0.03	0.30	2.28	4.92	20.01
P01_E17 Sala de Reuniões 3	78.12	3.98	2.51	1.58	0.56	0.13	0.02	0.00	-	0.01	0.12	1.45	3.53	13.89
P01_E18 Sala de Reuniões 1	78.14	5.35	3.57	2.13	0.88	0.15	0.02	-	0.00	0.02	0.24	2.26	5.05	19.69
Total	1250.00	4.65	3.15	2.00	0.92	0.22	0.04	0.01	0.01	0.03	0.24	1.94	4.31	17.52



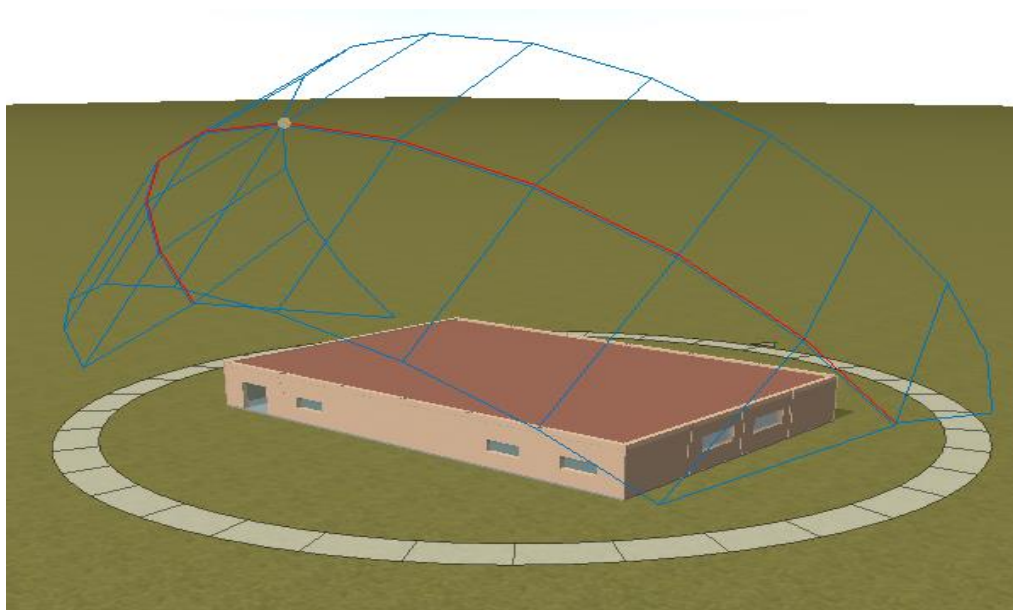
Compartimento	Superfícies (m²)	Meses (kWh/m²)												Total (kWh/m²)
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
P01_E01 Hall de Entrada	156.25	0.01	0.01	0.14	0.93	3.35	4.91	8.36	7.62	5.57	2.32	0.11	0.01	33.34
P01_E02 Gabinete 9	39.07	0.01	0.04	0.26	0.92	2.97	4.31	7.49	7.36	5.98	3.07	0.34	0.01	32.74
P01_E03 Corredor	239.28	0.01	0.01	0.11	0.83	3.10	4.61	7.79	7.23	5.19	2.12	0.08	0.01	31.10
P01_E04 Gabinete 6	51.25	0.01	0.01	0.01	0.37	2.27	3.80	7.31	6.76	4.90	1.34	0.02	0.01	26.82
P01_E05 Gabinete 1	39.06	0.01	0.01	0.03	0.59	2.59	4.15	7.18	6.50	4.71	1.67	0.04	0.01	27.48
P01_E06 Gabinete10	39.08	0.01	0.04	0.27	0.92	2.94	4.27	7.43	7.32	5.98	3.10	0.35	0.01	32.64
P01_E07 Gabinete 7	51.25	0.01	0.01	0.01	0.36	2.22	3.72	7.20	6.67	4.82	1.31	0.02	0.01	26.35
P01_E08 Gabinete 2	39.06	0.01	0.01	0.03	0.57	2.55	4.10	7.10	6.43	4.65	1.63	0.04	0.01	27.11
P01_E09 Gabinete11	39.08	0.01	0.04	0.26	0.92	2.94	4.26	7.43	7.32	5.98	3.10	0.35	0.01	32.63
P01_E10 Gabinete 8	51.24	0.01	0.01	0.01	0.36	2.23	3.73	7.21	6.68	4.83	1.32	0.02	0.01	26.41
P01_E11 Gabinete 3	39.06	0.01	0.01	0.03	0.57	2.55	4.11	7.11	6.43	4.66	1.64	0.04	0.01	27.15
P01_E12 Gabinete12	39.08	0.01	0.04	0.27	0.92	2.94	4.26	7.43	7.32	5.98	3.10	0.35	0.01	32.64
P01_E13 Sala de Reuniões 2	153.75	0.01	0.01	0.05	0.58	2.41	3.69	6.32	5.86	4.42	1.67	0.06	0.01	25.08
P01_E14 Gabinete 4	39.07	0.01	0.01	0.03	0.57	2.55	4.11	7.11	6.43	4.66	1.64	0.04	0.01	27.16
P01_E15 Gabinete13	39.08	0.01	0.04	0.26	0.92	2.96	4.29	7.46	7.35	5.99	3.09	0.35	0.01	32.73
P01_E16 Gabinete 5	39.07	0.01	0.01	0.03	0.58	2.57	4.13	7.15	6.48	4.69	1.65	0.04	0.01	27.34

Compartimento	Superfícies (m²)	Meses (kWh/m²)												Total (kWh/m²)
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
P01_E17 Sala de Reuniões 3	78.12	0.01	0.01	0.17	0.88	3.12	4.63	8.05	7.74	5.86	2.70	0.17	0.01	33.34
P01_E18 Sala de Reuniões 1	78.14	0.01	0.01	0.05	0.69	2.90	4.54	7.86	7.20	5.11	1.86	0.04	0.01	30.27
Total	1250.00	0.01	0.01	0.11	0.72	2.82	4.30	7.48	6.97	5.18	2.09	0.11	0.01	29.81

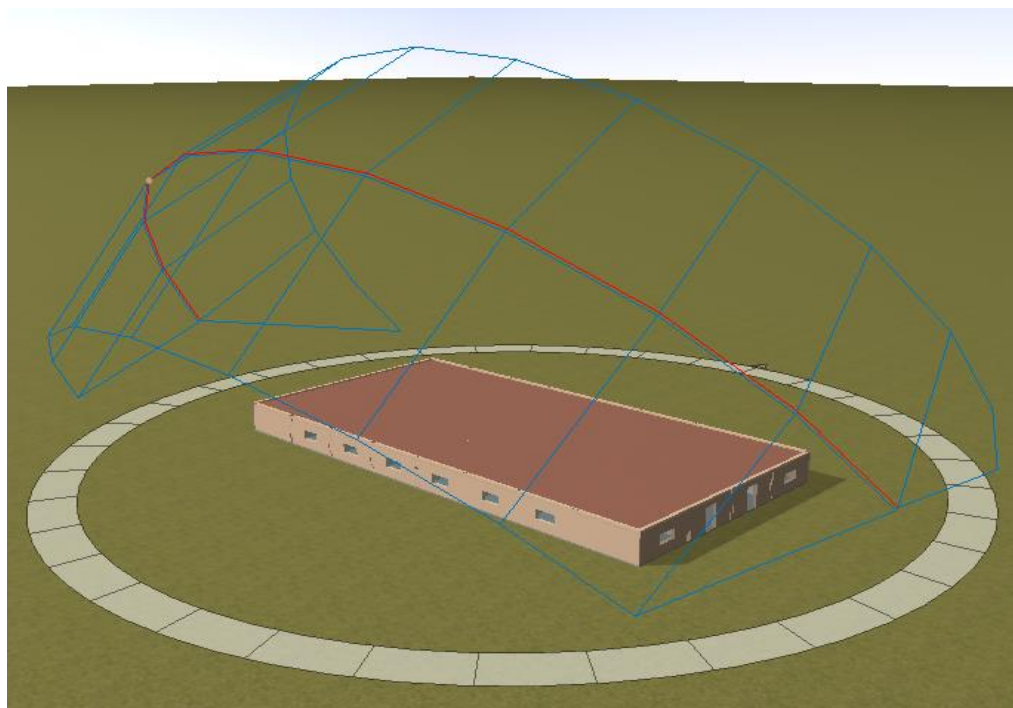


Anexo J – Representação dos edifícios simulados no *Cypeterm*

- Edifício monozona projetado no capítulo 3



- Edifício multizona projetado no capítulo 5



Anexo L – Análise aos programas utilizados

Um dos grandes objetivos deste trabalho era identificar as diferenças entre o programa *Cypeterm* e o RCCTE-STE. Algumas dessas diferenciações já foram discutidas atrás, contudo existem outras diferenças entre os programas que ainda não foram analisadas. Portanto neste anexo apresentam-se as vantagens e desvantagens dos programas citados.

Cypeterm

Vantagens:

- **Acesso ao programa** – foi com facilidade que se conseguiu obter uma versão provisória do *Cypeterm*. A empresa Top Informática, que é a fabricante e distribuidora do programa, após estabelecer um protocolo com a faculdade, rapidamente enviou um CD de instalação do mesmo. A instalação do programa é uma operação rápida e fácil;
- **Assistência e tutorias disponíveis gratuitamente** – na página de internet da Top Informática encontram-se vários documentos para *download* gratuito, como manuais e tutoriais passo a passo, bastante detalhados e úteis para quem se está a iniciar no programa. Para além disso ainda se encontram alguns vídeos explicativos na mesma página. Por fim, sempre que se recorreu à assistência do programa via *e-mail*, as respostas foram sempre rápidas e esclarecedoras;
- **Facilidade de introdução de dados** – a utilização de “máscaras” 2D de *AutoCAD* em conjunto com os dados do ITE 50 que o programa tem incorporados, leva a que a introdução de dados neste programa seja feita de uma forma fácil e rápida;
- **Utilização do motor de cálculo do *EnergyPlus*** – uma das razões que levou à seleção deste programa para este trabalho, foi o facto de este permitir uma exportação dos dados inseridos para o *EnergyPlus* utilizando-o como motor de cálculo. Nesse sentido o *Cypeterm* revelou-se uma boa interface para, provavelmente, o programa de simulação de edifícios mais utilizado em todo o mundo;
- **Certificado e adequado para Portugal** – este programa, por respeitar a norma ASHRAE 140-2004 e ainda estar aprovado pela ADENE para simulação dinâmica multizona, tanto

para aplicação do RCCTE como do RSECE, revelou-se uma boa opção para engenheiros/projetistas que trabalhem neste âmbito no nosso país.

Desvantagens/limitações:

- **Poucos ficheiros climáticos para o território nacional** – os ficheiros climáticos para utilizar no *EnergyPlus* encontram-se disponíveis na página de internet do programa. Contudo o número de cidades portuguesas é muito reduzido e pode criar dificuldades a quem pretende simular um edifício que se encontre num local mais longe das grandes cidades;
- **Necessidade de estar ligado à internet** – o *Cypeterm* para funcionar devidamente, obriga a que o computador onde se está a trabalhar esteja ligado à internet. Por vezes, como por exemplo numa faculdade, mesmo ligado à internet é necessários abrirem-se certas “portas” nos *routers* desse estabelecimento;
- **Cálculo do IEE** – a nível de resultados apresentados pelo programa, uma limitação que se encontrou é que o programa não determina o valor do IEE, pelo que, como visto no capítulo 5 deste trabalho obriga ao cálculo manual do mesmo;
- **Resultados *EnergyPlus*** – dentro do módulo do *EnergyPlus* existem poucos resultados. Ou seja, poderiam ser apresentados gráficos com as perdas/ganhos energéticos discriminados. Isto levaria a que não fosse necessário recorrer a mais programas, como foi feito neste trabalho por exemplo quando se utilizou o programa *xEsoView*;
- **Exige conhecimentos de AutoCAD** – sendo que forma mais fácil de introduzir os dados no programa é via desenhos 2D com extensão .DWG (extensão de ficheiros de *AutoCAD*), obriga que o utilizador possua também alguns conhecimentos neste programa bem como possivelmente uma licença paga deste programa;
- **Preço** – o programa apresenta diversas funcionalidades, contudo tem um preço base elevado e alguns dos módulos (como por exemplo o de exportação para o *EnergyPlus*) são pagos à parte. Sendo o *EnergyPlus* gratuito, dá que pensar se compensa por vezes, pagar por alguns interfaces para o mesmo.

RCCTE-STE

Vantagens:

- **Aprovado pela ADENE** – o programa é aprovado pela ADENE, preenchendo as folhas de cálculo dos regulamentos de forma automática e adequada;
- **Suficiente e prático para algumas situações** – é mais que suficiente para se verificar se um edifício se encontra de acordo com os regulamentos em vigor em Portugal. É igualmente útil para dimensionar alguns tipos de sistemas de climatização bem como para determinar o indicador de eficiência energética;
- **Bastante utilizado** – é um programa que já se encontra há alguns anos no mercado português. Nesse sentido, é bastante utilizado em gabinetes de engenharia sobretudo na área do dimensionamento dos sistemas de climatização. Já em gabinetes onde o objetivo passa, por exemplo por realizar auditorias energéticas, é muito pouco utilizado devido às suas limitações.

Desvantagens/limitações:

- **Simulação multizona** – apesar de o programa permitir este tipo de simulação, se se realizar espaço a espaço, não é nada simples nem prático de o fazer;
- **Desatualizado** – como já referido, este programa já se encontra há alguns no mercado. Apesar de já ter recebido algumas atualizações, continua a apresentar uma interface algo antiga e uma introdução de dados algo confusa. Quando se terminou este trabalho (Setembro de 2014), o programa acabou por ser descontinuado, tendo sido substituído por um novo, designado por *STE-MONOZONA*;
- **Alguns erros** – no decorrer deste trabalho o RCCTE-STE apresentou alguns erros, nomeadamente na introdução de elementos construtivos e na gravação desses elementos. Depois da introdução de inúmeros dados (como paredes, PTP, envidraçados, etc.) e respetiva gravação, muitas vezes queriam-se editar os mesmos e não conseguia, passando a solução por abrir e fechar o programa várias vezes. Por vezes na abertura de algumas soluções previamente gravadas, os seus campos apareciam com valor zero e impossíveis de editar. Por fim, a gravação e abertura de ficheiros revelou-se pouco evidente gerando algumas confusões e conflitos dentro da base de dados do próprio programa.